

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Institut dopravy - 342**

**Příprava 3D dat pro posuzování aerodynamiky kolejových  
vozidel**

**Preparation of 3D Data for Aerodynamics Assessment of Rail  
Vehicles**

**Student: Matouš Slowioczek**

**Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Dresler**

**Ostrava 2018**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Institut dopravy

## Zadání bakalářské práce

Student: **Matouš Slowioczek**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2301R003 Dopravní technika a technologie  
Téma: **Příprava 3D dat pro posuzování aerodynamiky kolejových vozidel**  
**Preparation of 3D Data for Aerodynamics Assessment of Rail Vehicles**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Analýza požadavků na 3D data z hlediska aerodynamiky vozidel
3. Výběr a popis konstrukčních celků kolejových vozidel důležitých pro posuzování aerodynamiky
4. Návrh postupu tvorby souboru 3D dat kolejových vozidel
5. Realizace 3D dat vybraných kolejových vozidel a jejich ověření v simulačním prostředí
6. Zhodnocení a doporučení
7. Závěr

Cílem práce je vytvořit soubor 3D dat, který bude vhodný k posuzování aerodynamických vlastností kolejových vozidel ve vybraném simulačním prostředí a jeho ověření.

Seznam doporučené odborné literatury:

HUCHO, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering. 4th ed. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers, 1998. ISBN 978-0768000290.

RŮŽIČKA, Tomáš. Jízdní odpor nákladních vlaků [online]. 2015 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/109485>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

User Manual k softwaru Star CCM+.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Dresler**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



---

doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry



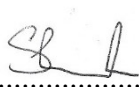
---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 21.5.2018


  
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5.2018



.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Matouš Slowioczek

Adresa trvalého pobytu autora práce: Petrovice u Karviné 253, 735 72

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SLOWIOCZEK, M. *Příprava 3D dat pro posuzování aerodynamiky kolejových vozidel*. Ostrava: Institut dopravy, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2018, Bakalářská práce, vedoucí: Dresler, P.

V této práci je vytvořena knihovna součástí kolejových vozidel tak, aby na nich bylo možné simulovat úlohy v oblasti aerodynamického proudění. Následně byla navrhnutá základní metodika skládání a vkládání součástí do simulačního programu a ověření jejich funkčnosti. Úvodní část práce je zaměřena na základní teorii ohledně kolejových vozidel, jejich pohybu, podrobněji jsou rozvedeny vozidlové odpory. Následně je rozvedena teorie obtékání těles, metody měření. Poté základní princip navrhnutí modelů a samotná realizace. Na závěr shrnutí dosažených výsledků a doporučení.

## ANNOTATION BACHELOR THESIS

SLOWIOCZEK, M. *Preparation of 3D Data for Aerodynamics Assessment of Rail Vehicles*. Ostrava: Institute of Transportation, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB-Technical University of Ostrava, 2018, Bachelor thesis, thesis head: Dresler, P.

In this thesis library of components of rail vehicles is created for possibility of simulating tasks in the field of aerodynamic flow. Subsequently, the basic methodology of composing and inserting components into the simulation program and verification of their functionality was proposed. The introductory part of the thesis is focused on the basic theory concerning the rail vehicles, their movement, and furthermore the vehicle resistances are developed. Then there is a explained theory of flows around the body, methods of measurement. Following part is about basic principles of modeling and implementation itself. Finally there is, a summary of the results and recommendations.

# Obsah

Seznam použitých zkratk .....	9
Úvod.....	10
1 Teoretický úvod .....	11
1.1 Kolejová vozidla .....	11
1.2 Klasifikace železničních vozidel podle účelu: .....	11
1.3 Klasifikace podle rozchodu.....	12
1.4 Klasifikace podle konstrukce .....	12
1.5 Klasifikace podle uspořádání pojezdu .....	12
1.6 Teorie pohybu kolejových vozidel.....	13
1.6.1 Aerodynamický odpor .....	15
1.6.2 Odpor valení .....	16
2 Požadavky na data z hlediska aerodynamiky vozidel.....	18
2.1 Základní termíny aerodynamiky .....	18
2.1.1 Tlakové pole .....	18
2.1.2 Proudnice .....	18
2.1.3 Mezní vrstva .....	19
2.2 Zjišťování aerodynamický parametrů .....	19
2.2.1 Aerodynamický tunel.....	20
2.2.2 Numerické výpočty a simulace.....	21
2.3 Pohled na data z hlediska aerodynamiky .....	23
3 Výběr konstrukčních celků kolejových vozidel.....	24
3.1 Hnací vozidlo .....	24
3.2 Narážecí ústrojí .....	25
3.3 Sběrač elektrického proudu.....	26
3.3.1 Pantograf.....	26
3.3.2 Polopantograf.....	27

3.4	Železniční vozy .....	27
3.4.1	Pojezd vozidla .....	28
3.4.2	Rám vozidla .....	29
3.4.3	Nástavba .....	29
4	Návrh postupu tvorby souboru 3D dat .....	32
4.1	Postup tvorby 3D dat vozidel .....	32
4.1.1	Návrh metodiky skládání součástí .....	32
4.1.2	Návrh umístění středu souřadnicového systému .....	35
4.1.3	Návrh aerodynamického tunelu .....	36
5	Realizace 3D dat a jejich ověření v simulačním programu .....	38
5.1	Konstrukce hnacích vozidel .....	38
5.2	Konstrukce tažených vozidel .....	42
5.2.1	Rám vozů .....	42
5.2.2	Konstrukce nástavby vozidel .....	43
5.3	Ověření dat v simulačním prostředí .....	47
5.3.1	Import modelů do simulačního programu .....	47
5.3.2	Tvorba simulačního prostředí .....	49
5.3.3	Vytvoření objemové sítě .....	50
5.3.4	Nastavení modelu .....	52
6	Zhodnocení a doporučení .....	55
7	Závěr .....	56
	Seznam použité literatury .....	58
	Seznam použitých obrázků .....	59
	Seznam tabulek .....	60
	Seznam příloh .....	60



## Seznam použitých zkratek

CAD	Computer Aided Design (počítačem podporované kreslení)
CFD	Computational Fluid Dynamics (numerická metoda modelování proudění tekutin)
ČD 363	jednosystémová lokomotiva Českých drah
DNS	Direct Numerical Simulation
Eas	čtyřnápravový vysokostěnný nákladní vůz
Falns	čtyřnápravový výsypný nákladní vůz
LES	Large Eddy Simulation
Mach	Machovo číslo, násobek rychlosti zvuku
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
Sggrss	šestinápravový vůz pro přepravu kontejnerů
Škoda 109E	třísystémová lokomotiva používaná výrobcem Škoda
Y25	dvounápravový podvozek nákladních vozů
Zaes	čtyřnápravový kotlový nákladní vůz

## Úvod

Železniční doprava se považuje za jednu z nejekologičtějších a nejméně energeticky náročných druhů dopravy. Zejména díky malým odporům při pohybu vozidla. Tato výhoda vyplívá z malé dotykové plochy mezi kolem a kolejnicí.

Zavedené vozidlové odpory, kde se ukrývá aerodynamický odpor vozidla, v dnešní době pravděpodobně neodpovídá skutečným odporům, což může být z důvodů nových konstrukčních principů i špatným postupem měření zavedených odporů. Obecně je trend v praxi při konstrukci kolejových vozidel hodnoty odporů snižovat a tím docílit snížení energetických nároků nebo také zvýšení rychlosti vozidel a také z důvodu ekonomického.

Práce se zabývá přípravou dat pro posuzování aerodynamických odporů. Bude vytvořena knihovna součástí vhodná pro posuzování aerodynamiky vozidel, která bude obsahovat alespoň dvě hnací vozidla a několik tažených vozidel a předem vytvořené aerodynamické tunely. Dojde k ověření jejich funkčnosti v simulačním programu STAR-CCM+.

Cílem práce je vytvořit soubor 3D dat, který bude vhodný k posuzování aerodynamických vlastností kolejových vozidel ve vybraném simulačním prostředí a jeho ověření.

# 1 Teoretický úvod

V této kapitole se zaměřím na rozebrání problematiky základní teorie ohledně kolejových vozidel, pohybu vlaku a podrobněji rozepíšu odpor valivý a aerodynamický z důvodu zaměření mé práce na tuto problematiku.

## 1.1 Kolejová vozidla

Železniční kolejové vozidlo je definováno jako drážní vozidlo, pro něž je charakteristické, že je nesené a směrově vedeno po železniční koleji.

Pod pojmem kolejové vozidlo můžeme rozumět:

- a) vozidlo železniční
- b) vozidlo pouličních drah
- c) vozidlo metra
- d) vozidlo průmyslových drah
- e) vozidlo pozemních lanových drah
- f) vozidlo dvoucestné

## 1.2 Klasifikace železničních vozidel podle účelu:

Železniční hnací vozidlo je takové vozidlo, které je schopné vyvíjet tažnou sílu na obvodu kol. Jsou vybavena hnacím zařízením. Dále slouží k brzdění, případně k zásobování energiemi ostatních vozidel. Patří mezi ně:

- a) Lokomotivy – jsou určeny výhradně k tažení nebo sunutí vlaků a posunu železničních vozidel
- b) Motorové a elektrické vozy – jsou určeny k tažení nebo sunutí vlaků a současně k přepravě osob nebo nákladu
- c) Motorové a elektrické jednotky – jsou ucelené soupravy trvale složené z motorových nebo elektrických, osobních vozů a řídicích vozů

Železniční vozy jsou určeny k dopravě osob a nákladů.

- a) Osobní vozy – vozy služební, poštovní, lůžkové, lehátkové, jídelní, bufetové, salonní a další
- b) Nákladní vozy – otevřené, zavřené nádržkové, kontejnerové, plošinové, výsypné, hlubinné, pro přepravu automobilů osobních, nákladních nebo návěsů

Speciální vozidlo je takové vozidlo, které je konstruováno pro údržbu, opravu, rekonstrukci dráhy, pro kontrolu a měření stavu dráhy, pro odstraňování následků nehod a mimořádných událostí.

### 1.3 Klasifikace podle rozchodu

Rozchod je obecně jmenovitá hodnota šířky volného prostoru mezi hlavami kolejnic.

- Normální rozchod – hodnota 1435 mm, rozšířen v Evropě, Amerika, Čína
- Široký rozchod – rozšířen v Rusku, Ukrajině (1520 mm) a další
- Úzký rozchod – Japonsko, Jižní Afrika, Švýcarsko, Slovensko

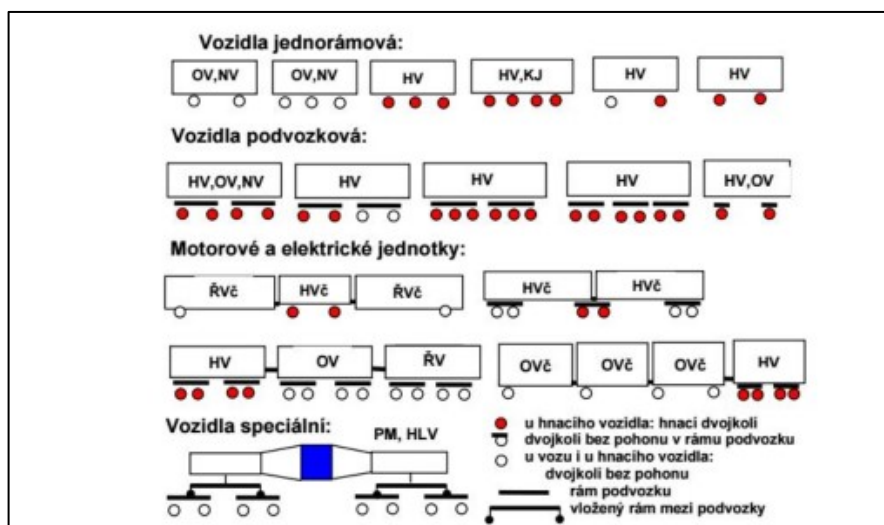
### 1.4 Klasifikace podle konstrukce

Konstrukce kolejového vozidla se skládá z následujících celků:

- Rám vozidla – tvoří hlavní nosnou část vozidla, jsou k němu vázány všechny ostatní celky, přenáší síly mezi nimi
- Pojezd vozidla – nese rám vozidla a vede vozidlo v koleji
- Nástavba vozidla – účelová část vozidla, u vozů slouží zpravidla jako prostor pro cestující nebo náklad
- Tažné a nárazecí ústrojí – přenáší síly od sousedních vozidel
- Brzdové zařízení – vyvozuje brzdovou sílu
- Hnací zařízení – vyvozuje tažnou sílu na obvodu kol

### 1.5 Klasifikace podle uspořádání pojezdu

Nejčastěji používané způsoby jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku



Obr. 1 Příklady uspořádání pojezdu žel. vozidel. HV...hnací vozidlo; ŘV...řídící vůz; OV...osobní vůz; KJ...kolejový jeřáb; NV...nákladní vůz; PM pojízdný mísič; HLV...hlubinný vůz; č...článek vozidlo <sup>1</sup>

## 1.6 Teorie pohybu kolejových vozidel

Pro základní popis pohybu kolejového vozidla slouží tzv. rovnice pohybu vlaku, která vychází z ideálního pohybu vlaku. Pro ideální pohyb vlaku, kde vlak považujeme jako homogenní a zanedbáváme tím jeho délku. Síly, které působí na vlak soustředíme do těžiště homogenního vlaku, tímto je vlak zredukován na jeden hmotný bod. Rovnováhu sil působící na vlak ve směru a proti směru, vyjadřuje rovnice pohybu vlaku (1). Jedná se o sílu tažnou, brzdou a odporové síly <sup>2</sup>.

$$F_o - \sum O - B = 0 \quad [\text{N}] \quad (1)$$

kde:

$F_o$  [N] – tažná síla

$\sum O$  [N] – součet odporů

$B$  [N] – brzdná síla

Jelikož při jízdě kolejových vozidel není žádoucí zároveň vyvíjet tažnou a brzdou sílu (až na speciální případy), bývá při výpočtech jedna z těchto složek nulová. Odpory jsou součtem vnějších sil působících na vozidlo. Můžeme je rozdělit na odpory traťové, vozidlové a odpory ze zrychlení (2) <sup>2</sup>.

$$\sum O = O_T + O_V + O_a \quad [\text{N}] \quad (2)$$

kde:

$O_T$  [N] – odpory traťové

$O_V$  [N] – odpory vozidlové

$O_a$  [N] – odpor ze zrychlení

### Základní rovnice pohybu vlaku

Na základě jednotlivých skupin působících na vozidlo, lze obecnou rovnici rovnováhy sil (1) dále rozepsat na základní rovnici pohybu vlaku <sup>2</sup>:

$$F_o - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T - (G_L + G_D) \cdot \frac{a}{g} \cdot (1 + \rho) = 0 \quad (3)$$

Po provedení úpravy rovnice (3) získáme konečný tvar rovnice (4) <sup>2</sup>:

$$F_o - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T = (G_L + G_D) \cdot \frac{(1+\rho)}{g} \cdot \frac{dv}{dt}$$

kde:

$F_O$  [N] – tažná síla na obvodu kola

$G_L$  [N] – tíha lokomotivy

$G_D$  [N] – tíha tažených vozidel

$o_L$  [-] – součinitel vozidlového odporu lokomotivy

$o_D$  [-] – součinitel vozidlového odporu tažených vozidel

$o_T$  [-] – součinitel odporu tratě

Traťové odpory  $O_T$  působí proti pohybu vozidla vlivem stavebního uspořádání tratě a tíhou vozidla.

K traťovým odporům patří:

- Odpor sklonu –  $O_{skl}$
- Odpor oblouku –  $O_{obl}$
- Odpor tunelu –  $O_{tun}$

Pro řešení mé bakalářské práce jsou traťové odpory nepodstatné, detailnější popis jednotlivých složek traťových odporů viz. skriptu <sup>2</sup>.

Vozidlové odpory jsou ovlivňovány mnoha činiteli. Zejména na konstrukčním provedení vozidla. Lze je popsat jako součet tří složek (5) <sup>2</sup>.

$$O_V = O_f + O_l + O_{vz} \text{ [N]} \quad (5)$$

kde:

$O_f$  [N] – odpor valivý

$O_l$  [N] – odpor tření v ložiscích

$O_{vz}$  [N] – odpor prostředí

Koeficienty vozidlového odporu jsou empiricky zjištěné a uspořádané v polynomu druhého stupně, tím lze určit součinitel vozidlového odporu dle vztahu (6) <sup>2</sup>:

$$o_V = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad (6)$$

kde:

a, b, c [-] – koeficienty jednotlivých složek vozidlového odporu

$V$  [km/hod] – okamžitá rychlost vozidla

$o_v$  [-] – součinitel vozidlového odporu

Výsledná hodnota vozidlového odporu je potom podle vztahu (7) <sup>2</sup>:

$$O_V = G_V \cdot o_v \text{ [N]} \quad (7)$$

### 1.6.1 Aerodynamický odpor

Součástí vozidlového odporu je aerodynamický odpor. Tento odpor představuje, v rovnici vozidlového odporu, kvadratickou složku závislou na rychlosti vozidla. Při nižších rychlostech je téměř zanedbatelný. Při vyšších rychlostech je však tento odpor dominantní a má, zejména u vysokorychlostních vozidel, velký vliv na jízdu vozidla. Aerodynamický odpor je reakcí na dynamický tlak vzduchu, který působí na čelní plochu vozidla. Velikost odporu závisí na rychlosti, hustoty vzduchu, velikosti čelní plochy ve směru jízdy, tvaru a řazení vozidla.

Obecný výpočet aerodynamické složky vozidlového odporu (8) <sup>3</sup>:

$$F_a = C_x \cdot S \cdot p_{dyn} = C_x \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{tek} \cdot v^2 \text{ [N]} \quad (8)$$

kde:

$F_a$	[N]	aerodynamický odpor
$C_x$	[-]	součinitel odporu závislý na tvaru překážky
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha překážky ve směru proudící tekutiny
$p_{dyn}$	[N.m <sup>-1</sup> ]	dynamický tlak na plochu S
$\rho_{tek}$	[kg.m <sup>3</sup> ]	hustota tekutiny
$v$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudící tekutiny

Hodnota součinitele tvaru  $C_x$  je ovlivněna tvarem vozidla a jeho řazením ve vlaku. Vesměs platí, že největší odpor vzduchu mají vozidla na čele soupravy, které svou jízdu stlačují vzduch před sebou a tím vzniká zmíněný dynamický tlak působící na čelo prvního vozidla soupravy. Zvýšený odpor vzduchu se také objevuje u posledního vozidla soupravy, za nímž vzniká podtlak.

Další prvky ovlivňující celkovou hodnotu aerodynamického odporu:

- sběrač (u motorové trakce výfuk)
- trakční výzbroj (dle umístění)
- zakrytí spodní části vozidla
- tvar skříně a bočnice hnacího a hnaných vozidel
- nárazecí ústrojí

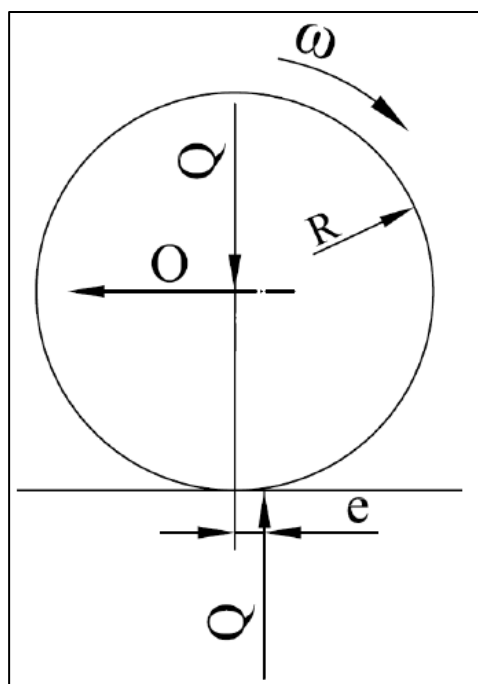
Hodnota koeficientu  $c$  pro výpočet vozidlového odporu lze určit, pokud je známa čelní plocha vozidla, součinitel odporu vzduchu a hmotnost vozidla, následujícím vztahem (9)<sup>3</sup>:

$$c = \frac{c_x \cdot S \cdot \rho_{vz}}{2 \cdot m \cdot g \cdot 3,6^2} [N \cdot kN^{-1}] \quad (9)$$

### 1.6.2 Odpor valení

Součástí vozidlového odporu je odpor valení. Jedná se o konstantní složku a jeho velikost nezáleží na rychlosti vozidla.

Výskyt odporu valení je důsledek deformace kola a kolejnice. Reakce koleje na zatížení kola je posunuta ve směru pohybu o rameno valivého odporu. Touto posunutou reakcí vzniká moment silové dvojice. Pokud je tento moment vztažen k poloměru kola, získáme odpor valení. Základní schéma (Obr. 2) a rovnice výpočtu odporu valení viz. níže.



Obr. 2 Schéma působení sil <sup>4</sup>



Obecný postup výpočtu dle obrázku (Obr. 2)<sup>4</sup>:

$$M_o = Q \cdot e = O \cdot R \text{ [Nm]} \quad (10)$$

$$O = \frac{Q \cdot e}{R} \quad (11)$$

kde:

O	[N]	odpor valení
Q	[N]	zatížení kola
R	[m]	poloměr kola
e	[m]	rameno valivého odporu

Výpočet koeficientu a vozidlového odporu<sup>4</sup>:

$$a = \frac{e}{R} \text{ [N]} \quad (12)$$

Velikost odporu dále ovlivňuje kvalita povrchu kola a kolejnice. Čím hladší povrch provozních ploch, tím bude odpor valení menší. U vozidel vybavených špalíkovou brzdou, dochází k otěru jízdní plochy kola, čímž vzniká drsná plocha, která má za následek větší odpor valení. Také dochází k opotřebení jízdní plochy kola a částečně také temene kolejnice.

V dnešní době pomocí nových konstrukčních řešení se odpor valení snižuje. Například jsou používány výhradně valivá ložiska pro snížení odporu a kotoučové brzdy (zejména na osobních vozech). U moderních vozidel se velikost členu a vozidlového odporu pohybuje v intervalu  $a \in \langle 1 \cdot 10^{-3}; 1,5 \cdot 10^{-3} \rangle$ .

## 2 Požadavky na data z hlediska aerodynamiky vozidel

### 2.1 Základní termíny aerodynamiky

#### 2.1.1 Tlakové pole

Vzduch se na povrchu tělesa různě stlačuje, což má za důsledek vytvoření nerovnoměrného tlakového pole, způsobující silovou nerovnováhu. Vlastnosti tlakového pole vychází ze zákona o zachování energie, dle Bernoulliho rovnice, která rozděluje tlak na:

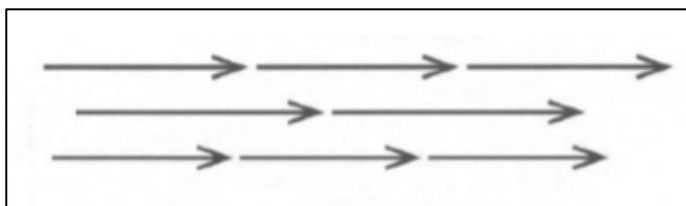
- Statický – odpovídá potenciální energii.
- Dynamický – odpovídá kinetické energii.
- Celkový – součet statického a dynamického tlaku.

Velikost a průběh působícího tlaku se mění s rychlostí obtékání. Pokud se jedná o nesymetrické těleso, proudění vzduchu kolem něj bude na každé straně vždy jiné. Čím vyšší rychlost na jedné ze stran tím bude dynamická tlak větší a statický menší.

#### 2.1.2 Proudnice

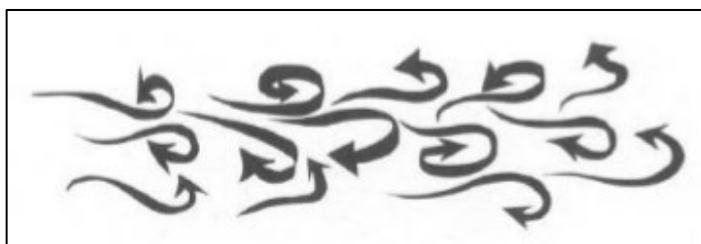
Je to dráha částice obtékající látky, např. vzduchu. Spojují se do tzv. proudového svazku. Proudění můžeme rozdělit dle tvaru proudnic:

- Laminární (ustálené) – proudnice se pohybují rovnoběžně, jejich dráhy se nekříží a částice nerotují, ale posouvají.



Obr. 3 Laminární proudění <sup>3</sup>

- Turbulentní (vířivé) – proudnice se roztácejí a kříží



Obr. 4 Turbulentní proudění <sup>3</sup>

Také může dojít k odtrženému proudění, neopisuje tvar tělesa a dochází k němu na konci tělesa, kde se odtrhává mezní vrstva.

### 2.1.3 Mezní vrstva

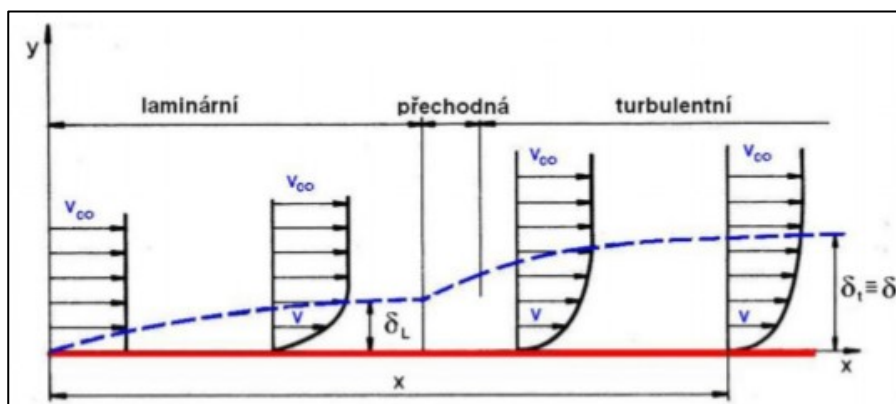
Před obtékanou deskou, která je umístěna rovnoběžně k proudu, mají částice stejnou rychlost a směr. Některé částice na desce ulpí a mají nulovou rychlost. Tyto částice poté brzdí další částice, které se pohybují v blízkosti obtékané desky. Dochází k tření částic s rozdílnou kinetickou energií a vzniká teplo. Mezní vrstva potom je oblast v těsné blízkosti desky, kde dochází ke změně rychlosti. Byl zaveden tzv. rychlostní gradient platí (13)<sup>3</sup>:

$$\frac{\partial v}{\partial y} \neq 0 [-] \quad (13)$$

Mezní vrstva se mění ve směru tělesa. Mění se její tloušťka a neuspořádané proudění, která mezní vrstvu dělí na:

- Laminární – uspořádaný pohyb tekutiny, vrstvy jsou několikanásobně menší než turbulentní.
- Turbulentní – náhodný pohyb, velká výměna energie a hmoty ve vertikálním směru mezi vrstvami.

Na obrázku níže (Obr. 5) je znázorněna velikost mezní vrstvy, v závislosti na jejím typu a vzdálenosti od hrany desky.



Obr. 5 Mezní vrstva a rychlostní profil proudící kapaliny na desce<sup>3</sup>

## 2.2 Zjišťování aerodynamický parametrů

Moderními metodami zjišťování aerodynamických parametrů vozidel umožňuje dnešní doba konstruktérům a návrhářům projevit větší kreativitu, jelikož mohou projevit svou kreativitu bez toho, aniž by museli navržený model vyrobit. Návrhy mohou vytvořit v programech a potřebné aerodynamické parametry zjišťovat na modelu.

Parametry se zjišťují základními třemi způsoby:

- Aerodynamický tunel
- Numerické výpočty a simulace

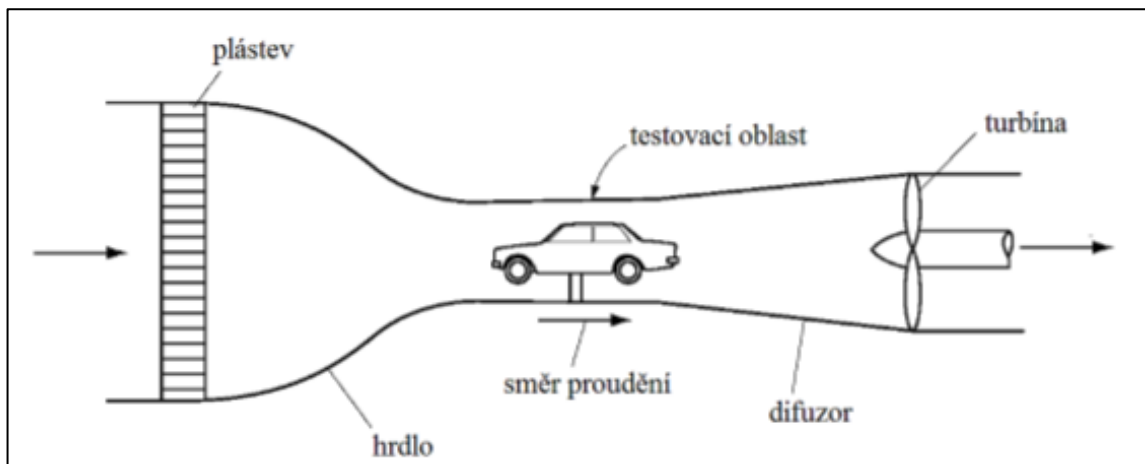
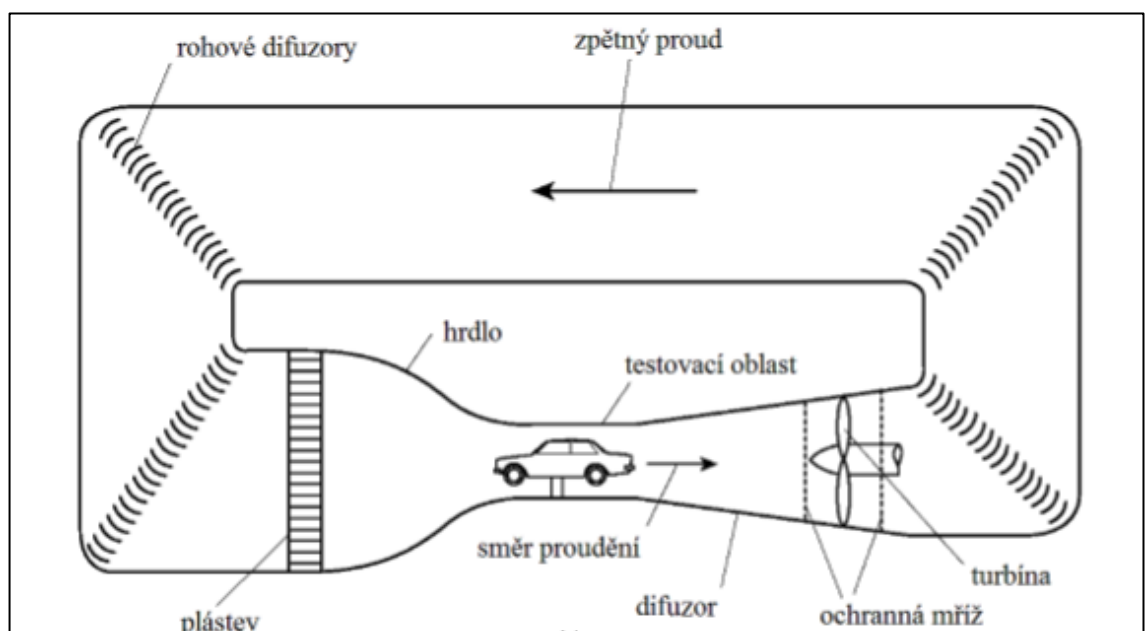
- Jízdní zkoušky

### 2.2.1 Aerodynamický tunel

V aerodynamickém tunelu je navozeno prostředí, kde rychlost, směr proudění a teplota vzduchu jsou nezávislé na okolním prostředí. Tyto podmínky jsou kontrolovány a podle potřeby měněny. Při testech se převážně používají zmenšené modely reálného vozidla, ale to není tak přesné jak měření na skutečném vozidle. V aerodynamickém tunelu jsou zjišťovány skutečné hodnoty součinitele odporu  $c_x$ , součinitele vztlaku, tvaru rychlostního pole při obtékání vozidla a průběh statického tlaku na povrchu karoserie.

Tunely lze rozdělit:

- Dle jejich vlastností:
  - Tlak vzduchu
  - Velikost
  - Rychlost proudícího vzduchu
  - Systém oběhu proudícího vzduchu
- Dle systému oběhu proudícího vzduchu
  - Systém s uzavřeným oběhem proudícího vzduchu
  - Systém s otevřeným oběhem proudícího vzduchu
- Dle rychlosti proudícího vzduchu
  - Subsonické, rychlost proudění do 0,8 Mach
  - Transonické, rychlost proudění 0,8 - 1,2 Mach
  - Supersonické, rychlost proudění 1,2 – 5 Mach
  - Hypersonické, rychlost proudění vyšší než 5 Mach
- Dle tlaku vzduchu
  - S atmosférickým tlakem vzduchu
  - S proměnným tlakem vzduchu

Obr. 6 Aerodynamický tunel s otevřeným systémem <sup>4</sup>Obr. 7 Aerodynamický tunel s uzavřeným systémem <sup>4</sup>

### 2.2.2 Numerické výpočty a simulace

Existují různé přístupy řešení. Zjišťování chování proudění experimentálně, velice drahé a náročné na čas. V dnešní době více využívané simulace CFD (Computational Fluid Dynamics) neboli matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin. Prvním krokem je vytvoření 3D modelu a poté jeho převedení na síť, podobně jako u metody konečných prvků. Hustota vytvořené sítě má vliv na výsledek simulace a čas výpočtu. Kompromisem může být zhušťování sítě na kritických místech a na plochách relativně rovných a souvislých bude síť méně hustá.

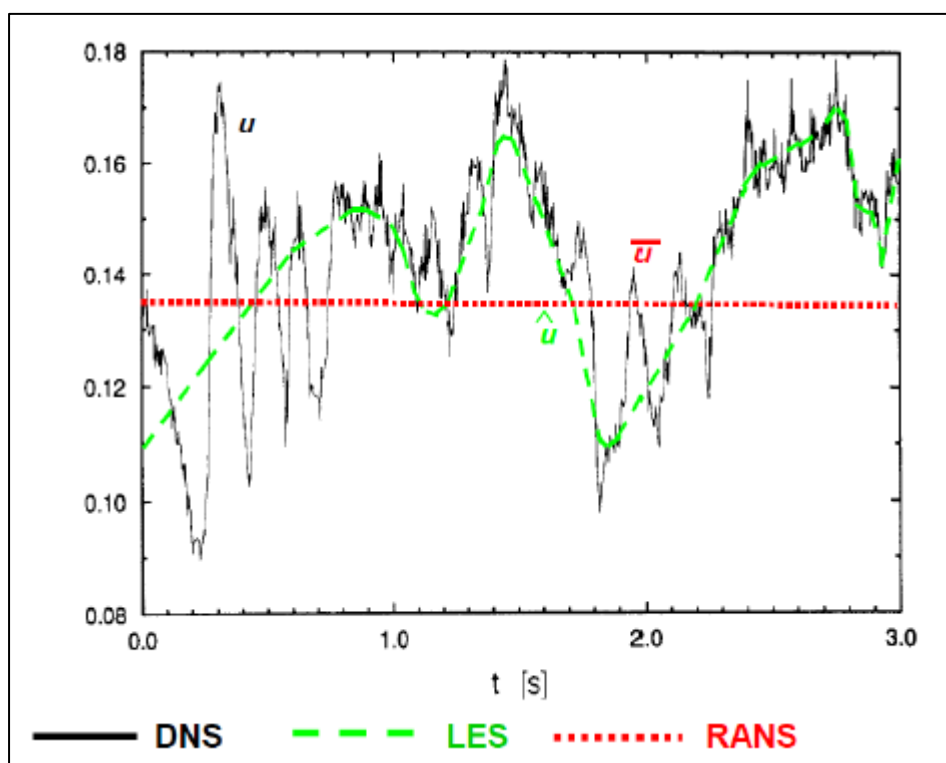
Při matematickém modelování turbulentního proudění se používají tři metody, vycházející z rovnic popisujících proudění:

- Metoda přímé simulace (DNS – Direct Numerical Simulation)
- Metoda velkých vírů (LES – Large Eddy Simulation)
- Metoda časového středování (RANS – Reynolds Average Navier-Stokes)

Metoda přímé simulace má velice vysoké nároky na výpočetní výkon, vyžaduje velmi jemnou síť modelu. Velmi obtížné řešit úlohy touto metodou z důvodu nedostatku výpočetního výkonu.

Metoda velkých vírů nevyžaduje tak jemnou síť jako metoda přímé simulace. Matematické modelování velkých vírů nevyžadují velmi jemnou síť a malé víry se významně nepodílí na transportních jevech. Výpočetní výkon je dostačující na tuto metodu.

Metoda časového středování je nejméně náročná na výpočetní výkon a dnes v praxi nejpoužívanější.



Obr. 8 Porovnání výsledků jednotlivých matematických modelů v čase <sup>4</sup>

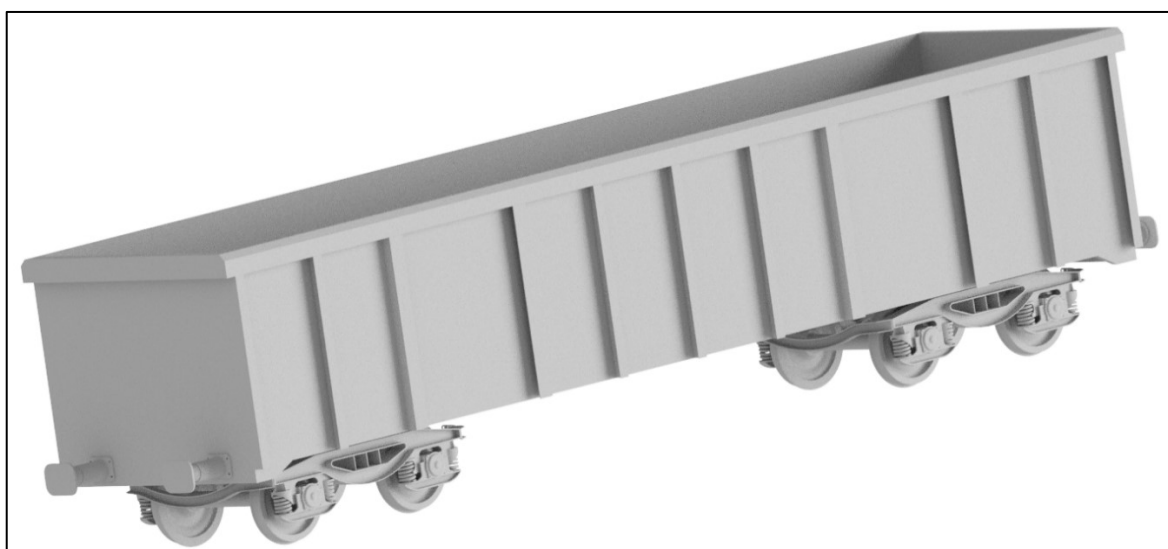
## 2.3 Pohled na data z hlediska aerodynamiky

Všechny 3D modely jsem vytvořil v software Autodesk Inventor. Vozidla jsou primárně modelována pro otestování a zjišťování velikosti odporu vzduchu. K zjištění velikosti odporu vzduchu jsem zvolil software STAR-CCM+. Pro použití dat ve software STAR-CCM+ bylo nutné modely před použitím převést na formát Step (koncovka souboru .stp). Dále dokáže program načíst soubory ve formátu parasolid (koncovka .x\_t nebo .x\_b) nebo IGES (koncovka .iges).

Autodesk Inventor je parametrický, adaptivní 3D CAD software sloužící pro tvorbu 3D modelů, 2D výkresové dokumentace, prezentace a fotorealistické vizualizace a animace, i správu dokumentů a konstrukčních dat.

Star\_CCM+ je CFD software sloužící ke komplexnímu modelování proudění tekutin s využitím různých matematických modelů. Kromě simulace aerodynamického odporu lze také zkoumat přestup tepla, spalování, vliv gravitace, radiace, funkci tepelných výměníků a ventilátorů. Je možno zkoumat jak 2D data tak také 3D data modelů. V mém případě řeším 3D data.

Jelikož výpočty ve STAR-CCM+ mají vysokou náročnost, tak tomu také odpovídá hloubka prokreslení navržených součástí. Vymodelovány jsou pouze ty části vozidel, které mají mít největší vliv na aerodynamický odpor – skříň, sběrač, podvozky, tvar nástaveb vozů.



*Obr. 9 Vymodelovaný vůz Eas\_52 Autor*

### 3 Výběr konstrukčních celků kolejových vozidel

V této kapitole jsem vybral konstrukční celky kolejových vozidel důležité pro posuzování aerodynamiky vozidla.

#### 3.1 Hnací vozidlo

Lokomotiva je hnací vozidlo, které je určeno pro pohybování s jinými železničními kolejovými vozidly nebo pro přepravu nákladu, popř. pro zásobování jiných železničních kolejových vozidel energií.

Při působení aerodynamických vlivů je zásadní čelo vlaku a jeho tvar. Pro porovnání vlivu tvaru lokomotivy na aerodynamický odpor celé soupravy, jsem vybral dvě lokomotivy.

První vybraná lokomotiva je Škoda druhé generace řady 363. Jedná se o starší lokomotivu s jednoduchým tvarem skříně a čela vozidla.



Obr. 10 Škoda E499.1 (363) <sup>5</sup>

Druhou vybranou lokomotivou je Škoda 109E (380). Jedná se o modernější typ lokomotivy s konstrukční rychlostí do 200 km/h. Vybral jsem tuto lokomotivu z důvodu větší provozní rychlosti, tudíž i propracovanějším tvarem skříně.





Obr. 11 Škoda 109E (380) <sup>5</sup>

### 3.2 Narážecí ústrojí

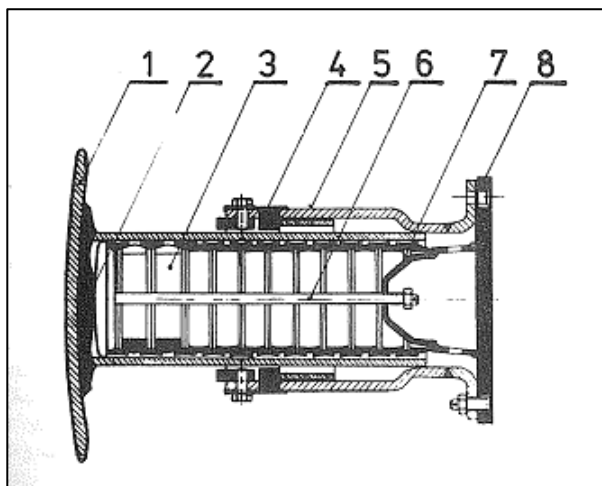
Narážecí ústrojí je tvořeno dvěma shodnými nárazníky na každém čele vozidla (Obr. 12). Talíř nárazníku tvoří pohyblivou část nárazníku a je spojený s vodící trubicí. Talíř nárazníku je vypouklý a má tvar kulového vrchlíku o poloměru 1500 mm. Rozměry nárazníku jsou dány mezinárodními předpisy přesněji vyhláškou UIC 527-1.

Základní deska nárazníku je přišroubována k čelníku vozu a je opatřena trubicí, s níž tvoří koš nárazníku. Uvnitř nalezneme vypružení, zpravidla prstencová pružina, které tlumí rozkmitání vozidel při nárazech.

Jedním z důležitých parametrů nárazníků je jejich kapacita. Je to maximální energie, kterou může nárazník absorbovat při úplném stlačení pružiny. U nákladních vozů se používají tzv. velkokapacitní nárazníky. Tyto nárazníky používají pro vypružení pryž a plastickou látku elastomer a mají kapacitu až 70 kJ.

Základní rozměry nárazníků:

- Délka je jednotná 620 mm.
- Pracovní zdvih dvojí 105 nebo 75 mm.
- Rozteč os nárazníků je 1750 mm.



Obr. 12 Trubkový nárazník: 1) Vypouklý talíř, 2) Podložka, 3) Prstencová pružina, 4) Dvojitý kroužek, 5) Koš nárazníku, 6) Tyč, 7) Sedlo, 8) Základní deska <sup>6</sup>

### 3.3 Sběrač elektrického proudu

Sběrač elektrického proudu je důležitá část vozidel elektrické trakce. Mechanické zařízení sloužící pro odebrání elektrického proudu z trakčního vedení a přivádějící ho do hnacího vozidla.

Mezi základní typy sběračů patří pantografy (dvouramenné, nůžkové sběrače) a polopantografy (jednoramenné). Další typy sběračů jsou např. kladkový nebo lyrový sběrač.

#### 3.3.1 Pantograf

Pantograf neboli dvouramenný sběrač má jednoduchou konstrukci. Rám je usazen na izolátorech, aby se zabránilo probíjení do kostry lokomotivy. Pod krytem, který je uložený na rámu sběrače, se nacházejí pneumatické válce a pružiny. Po napuštění pneumatického válce zatlačí pístnice na převod, který způsobí zdvihání spodních pák, čímž se zdvihají také horní vzpěry. Na vrcholu sběrače je upevněn držák, který je osazen smykadlem (lyžinami), obvykle dvěma. Smykadla jsou lišty, které jsou přímo v kontaktu s trolejovým drátem. Jsou odpružena, aby nedošlo, z důvodů nerovností, ke ztrátě kontaktu s trolejovým vedením. Dále jsou opatřena mazacími drážkami pro přívod maziva, nejčastěji grafitová vazelína.



Obr. 13 Pantograf tramvaje typu T3 <sup>7</sup>

### 3.3.2 Polopantograf

Modernější typ sběrače elektrického proudu. Funguje obdobným způsobem jako pantograf, ale oproti něj má pouze jednu spodní páku a dvě horní vzpěry, nesoucí držák se smykadly. Zdvih polopantografu je náročnější než u pantografů, a to z důvod jen jedné spodní páky.



Obr. 14 Polopantograf jednotky řady 680 <sup>7</sup>

## 3.4 Železniční vozy

Železniční vůz je tažené vozidlo, které není schopno vyvíjet tažnou sílu. V mé práci se omezím na vozy nákladní dopravy. Nákladní vozy nám slouží pro přepravu nákladu. Podle provedení a uspořádání dělíme nákladní vozy do následujících skupin:

- Otevřený vysokostěnný vůz
- Krytý vůz
- Chladicí vůz

- Plošinový vůz
- Cisternový vůz
- Vůz s nádobami
- Hlubinný vůz
- Nízkostěnné vozy
- Výsypné vozy
- Speciální vozy

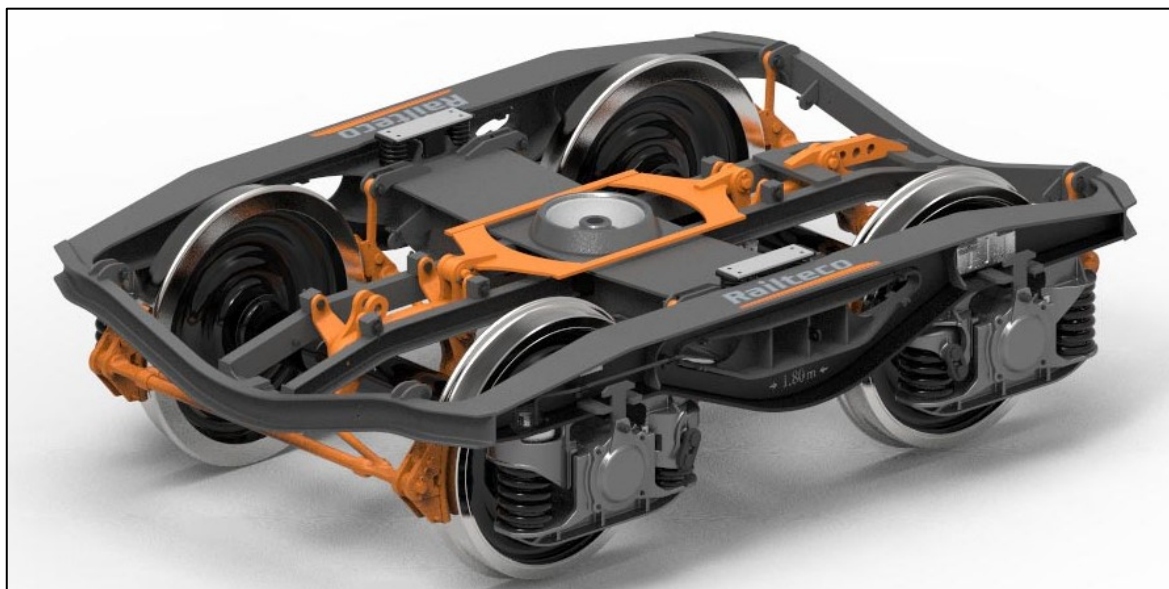
Mezi hlavní konstrukční části vozů patří pojezd, skříň, která se skládá ze spodku (samotný rám vozu, nárazecí a spřáhlové ústrojí) a nástavby.

### 3.4.1 Pojezd vozidla

Slouží k nesení a vedení vozu po koleji a přenáší podélné síly na rám vozidla. Základní části pojezdu:

- Dvojkolí
- Ložisková skříň
- Systém vedení dvojkolí
- Vypružení
- Brzdy

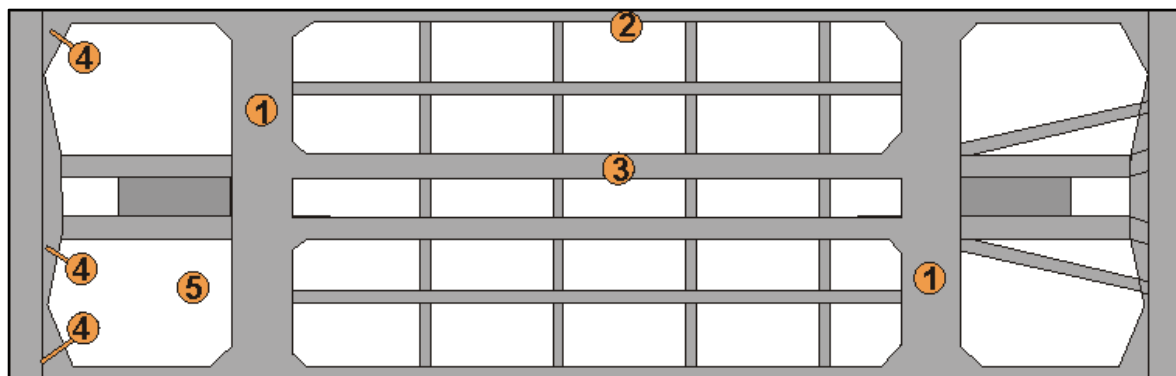
Základní rozdělení pojezdů je na pojezdy rámové a podvozkové. Podvozkové vozy se vyznačují samostatným rámem, který má jistou pohyblivost vůči spodku skříně vozu.



Obr. 15 Pojezd podvozkového vozu typu Y25 <sup>8</sup>

### 3.4.2 Rám vozidla

Slouží k přenosu podélných sil působících na vozidlo, k nesení nástavby a upevnění pojezdu. Rám podvozkového vozu je složen z ocelových nosníků obdélníkového průřezu. Skládá se z hlavních příčných, středních podélníků, podélný a šikmých výztuh a krajních podélníků.



Obr. 16 Rám podvozkového vozu: 1) Hlavní příčníky, 2) Krajní podélníky, 3) Střední podélníky, 4) Výztužné desky, 5) Představková část <sup>9</sup>

### 3.4.3 Nástavba

Nástavba nákladního vozu musí umožňovat snadnou nákladku, výkladku a manipulaci s nákladem. Musí také mít pevnou konstrukci a odolnost proti povětrnostním vlivům. V mé bakalářské práci jsem zahrnul vozy vysokostěnné, plošinové pro přepravu kontejnerů, kotlové vozy a výsypné vozy.

#### Vysokostěnný vůz řady E

Tímto označením jsou definované otevřené vozy běžné stavby. Jsou určeny a slouží pro přepravu volně loženého a sypkého zboží, kusového volně loženého zboží, které při přepravě nevyžaduje krytý prostor a ochranu před povětrnostními vlivy.





*Obr. 17 Vysokostěnný vůz typu Eas-52 <sup>5</sup>*

### **Plošinový vůz řady S**

Jedná se o šesti nápravový plošinový vůz speciální stavby, sloužící pro přepravu kontejnerů.



*Obr. 18 Plošinový vůz typu Sgmrss 55 <sup>5</sup>*

### **Kotlový vůz řady Z**

Kotlový vůz s kovovou nádrží pro přepravu tekutých nebo plyných produktů, obecně kapalného potravinářského nebo chemického průmyslu, stlačených a zápalných plynů. Některé vozy mají izolovaný kotel nebo jsou vybaveny topnicemi pro ohřev přepravovaného zboží.



Obr. 19 Kotlový vůz Zacns<sup>5</sup>

### Výsypný vůz řady F

Čtyřnápravový výsypný vůz typu Falns. Je určen pro přepravu uhlí, koksu a dalších volně ložených sypkých substrátů. Má pneumaticky ovládané výsypné klapky na bocích vozu.



Obr. 20 Výsypný vůz Falns<sup>5</sup>

## 4 Návrh postupu tvorby souboru 3D dat

Knihovna součástí obsahuje soubor 3D dat. Tento soubor se skládá z vymodelovaných aerodynamických tunelů a jednotlivých vozidel.

### 4.1 Postup tvorby 3D dat vozidel

Všechny data jsou vymodelovány v měřítku. Tedy pro vymodelování jednotlivých vozů jsem musel čerpat z volně dostupné výkresové dokumentace a pro další zpřesnění modelovaných součástí jsem některé rozměry zjišťoval měřeními v praxi.

Jak bylo uvedeno výše, práce je zaměřena na kompletní realizaci souboru 3D dat kolejových vozidel od návrhu až po ověření v simulačním programu. Prvním krokem bylo navrhnout, jaké typy vozů a lokomotiv zvolit, navrhnout jejich metodiku skládání a snadné vkládání součástí do simulačního programu a následná realizace.

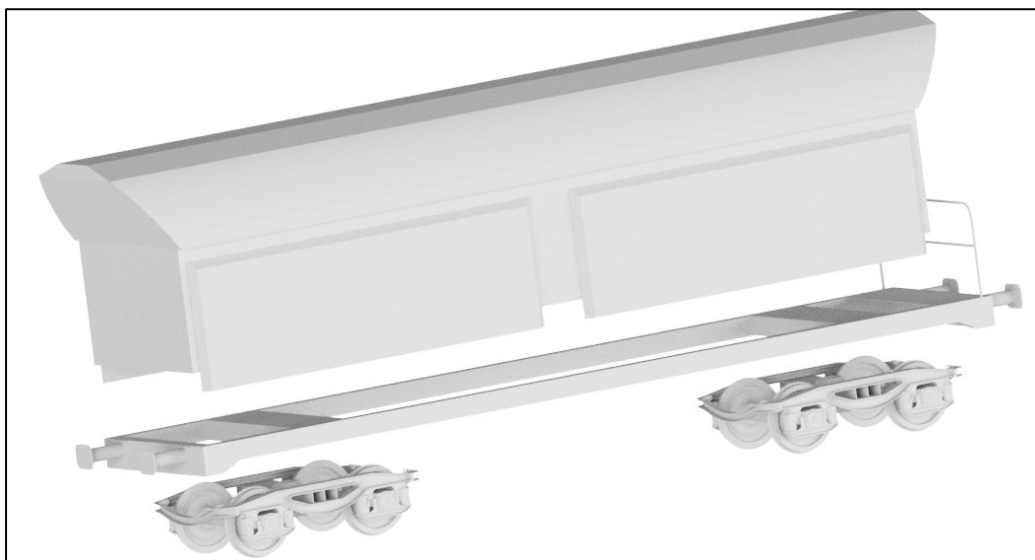
#### 4.1.1 Návrh metodiky skládání součástí

Jedním z cílů práce bylo vytvořit data tak, aby je kdokoli mohl jednoduše složit a vložit do simulačního programu. Z tohoto důvodu jsem se musel zaměřit na to, aby bylo možné data bez větších problémů složit a vytvořit tzv. modularitu součástí. Za tímto problémem jsem vytvořil pro každý vůz jednoduchou metodiku pro jejich složení. Samozřejmě lze každý vůz skládat různými způsoby a jednoduše je upravovat a také je možné složit různé vozy. Je to v podstatě základní balíček pro všechny druhy vozů.

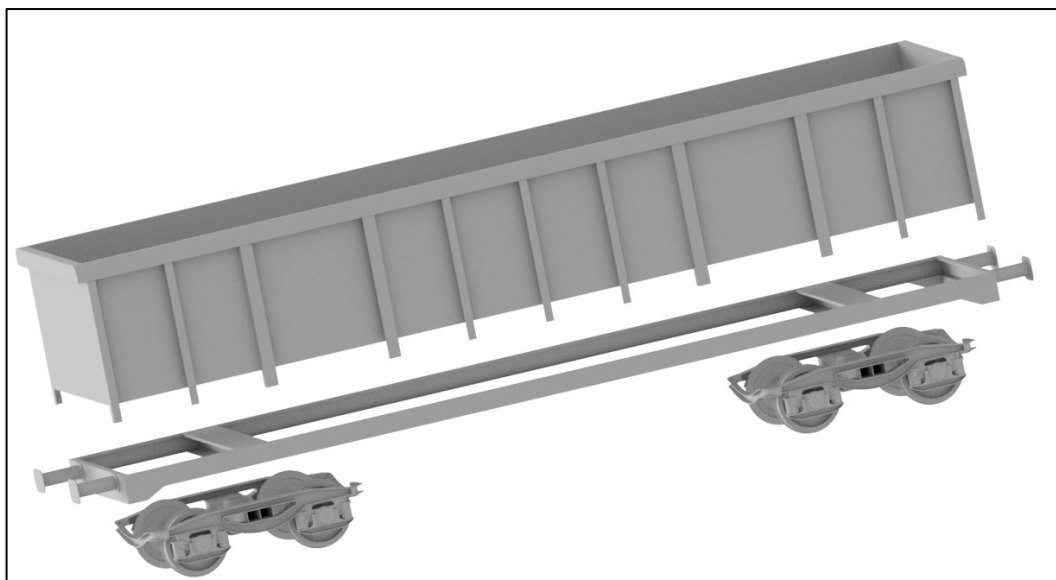
Pro svou knihovnu součástí jsem navrhnul jeden univerzální podvozek pro všechna tažená vozidla a několik různých rámců, vycházejících ze základního prototypu. Dále byl vytvořen základní model nárazníků obecně pro všechna vozidla. Nárazníky jsem umístil 1060 mm vzdálené od temene kolejnic. Umístění nárazníků, a jejich vzdálenost, je důležitým bodem pro vkládání součástí do simulačního programu a následné složení vlaku.

Jednotlivé části modelů lze zkoumat v simulačním programu zvlášť nebo je lze sestavit v CAD softwaru anebo přímo v simulačním programu STAR-CCM+ (Obr. 21).



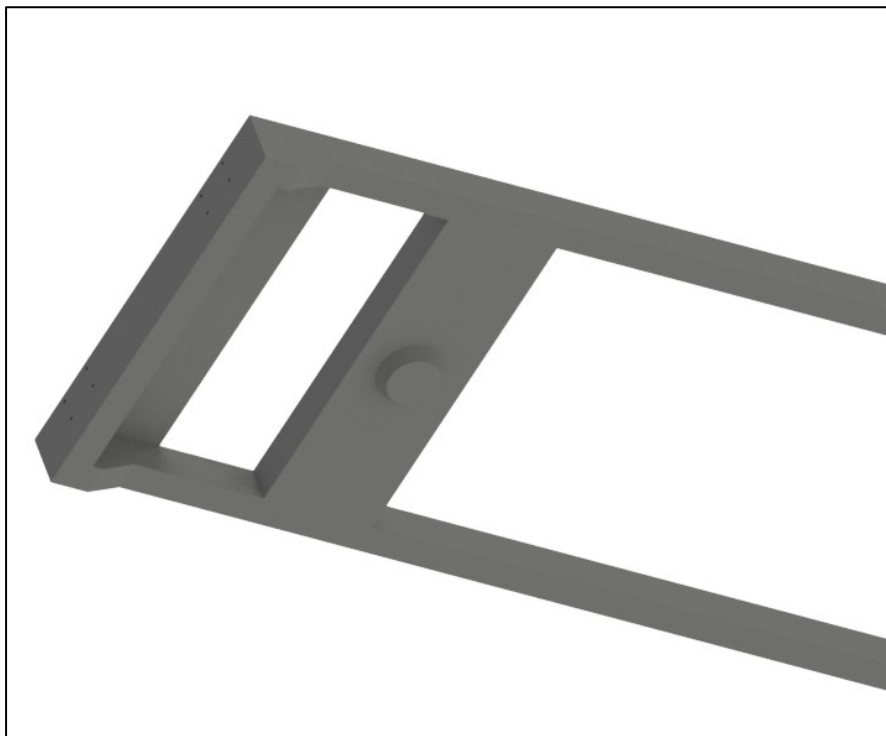


*Obr. 21 Sestavení výsypného vozu <sup>Autor</sup>*

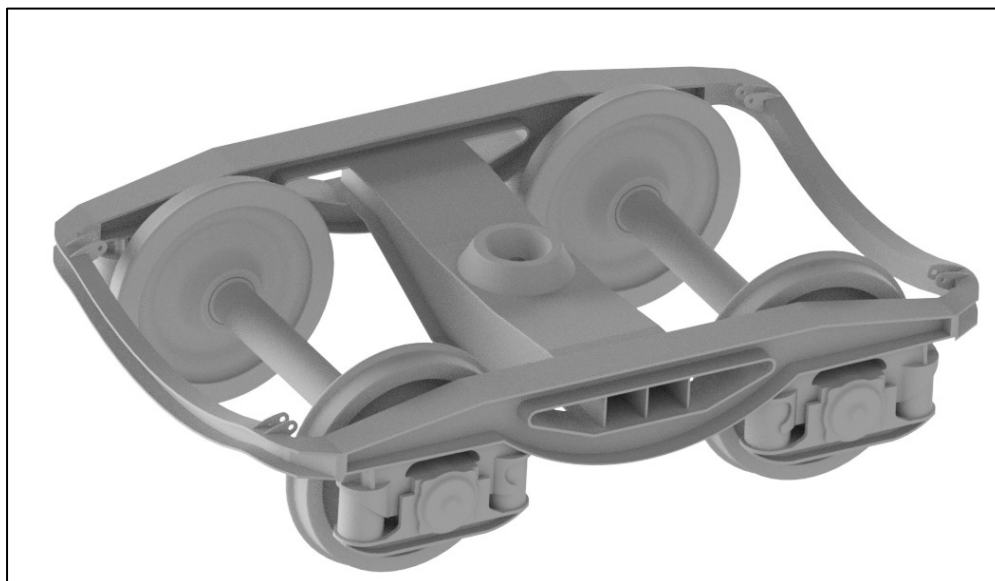


*Obr. 22 Sestavení vysokostěnného vozu <sup>Autor</sup>*

Každý rám jsem opatřil jednoduchým základním domkem reprezentujícím čepový domek, pro jednodušší spojení rám + podvozek (Obr. 23). Čepový domek je v přesné vzdálenosti od čela rámu. Podvozek má taktéž vymodelovaný čepový domek v předepsané vzdálenosti od temene kolejnic. Vše je zjednodušené z důvodu zanedbatelného vlivu na aerodynamiku vozidla.



*Obr. 23 Umístění čepového domku na rámu <sup>Autor</sup>*



*Obr. 24 Umístění čepového domku na podvozku <sup>Autor</sup>*

Vkládání součástí do simulačního programu lze jednotlivě nebo po celých sestavách. Z tohoto důvodu jsou připraveny jak celé sestavy vozů, tak také jsou převedeny základní konstrukční celky. Pro ostatní uživatele jsem navrhnul základní vzdálenosti vkládání jednotlivých vozů od středu osy souřadnic (Příloha 1) a metodiku pro vkládání součástí do simulačního programu (Příloha 2).

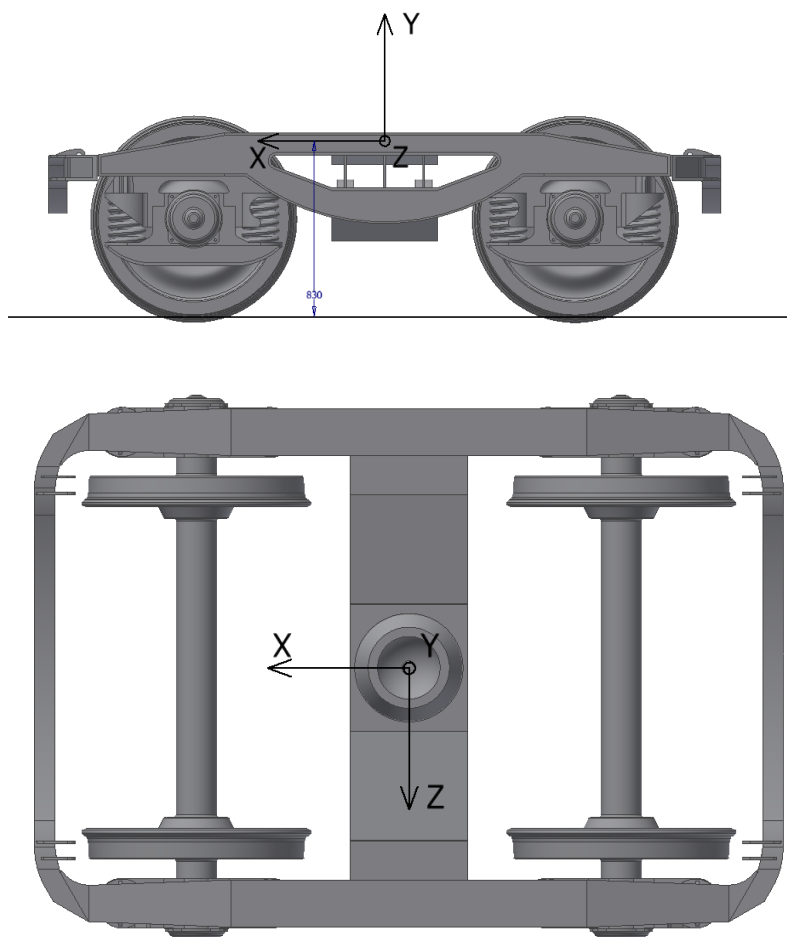
#### 4.1.2 Návrh umístění středu souřadnicového systému

Prvním bodem je navrhnutí umístění středového bodu souřadnicového systému pro jednodušší vkládání a umístění dat v tunelu simulačního softwaru. Kvůli různým možnostem složení součástí jsem navrhnul souřadnicový systém zvlášť pro pojezdy vozů a pro celé sestavy složených vozů. Platí pro pojezdy lokomotiv a vozů.

##### Souřadnicový systém pojezdu

Umístění středu souřadnicového systému:

- Vzdálenost středu od temene kolejnic – 830 mm



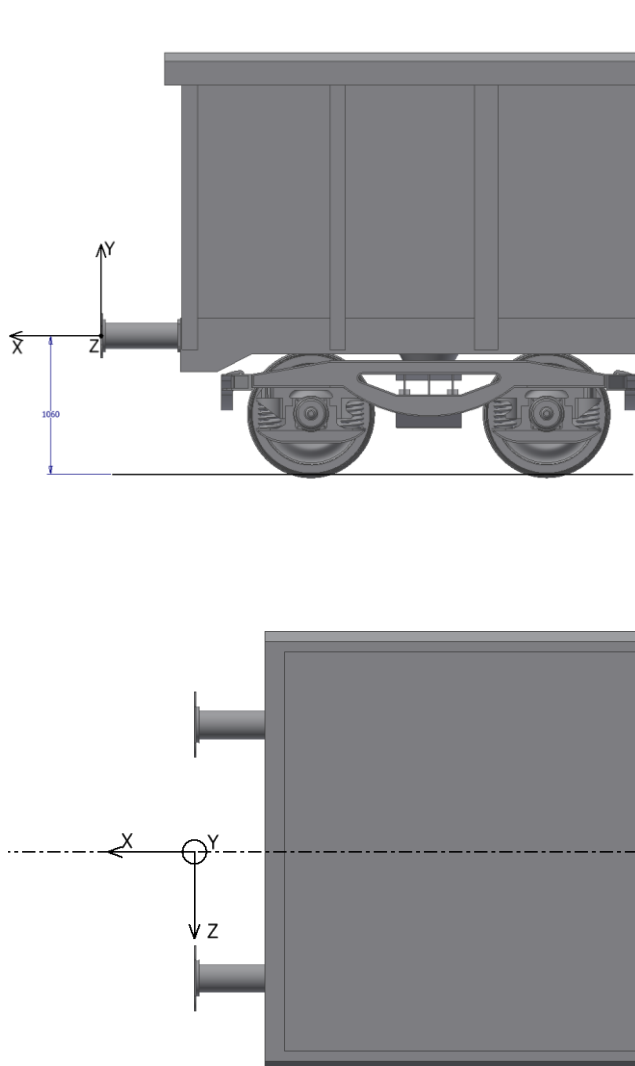
Obr. 25 Umístění středu souřadnicového systému pojezdu *Autor*

##### Souřadnicový systém vozů

Střed souřadnic jsem umístil na čele nárazecího ústrojí uprostřed vozu. Vzdálenost osy nárazníků jsem navrhnul jednotně pro všechny vozy od temene kolejnice.

Umístění středu souřadnicového systému:

- Vzdálenost osy nárazníků od temene kolejnic – 1060 mm

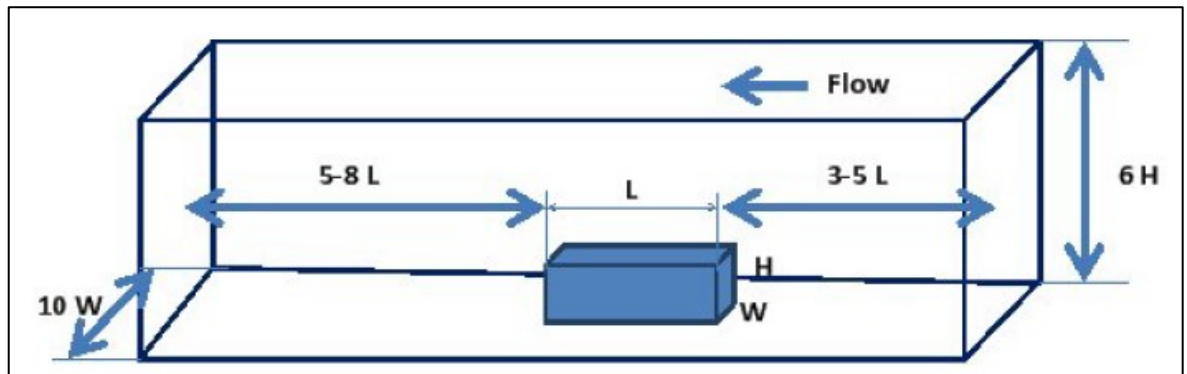


Obr. 26 Umístění středu souřadného systému vozů <sup>Autor</sup>

#### 4.1.3 Návrh aerodynamického tunelu

Vytvořený aerodynamický tunel musí splňovat předepsané rozměry pro program Star-CCM+. Při navrhování parametrů aerodynamického tunelu jsem vycházel ze základní metodiky. Pro experimentální simulaci na otevřeném prostranství by měl tunel generovat překážkový poměr menší než 0,2 %. Překážkový poměr se počítá jako poměr mezi promítanou čelní plochou k průřezu oblasti aerodynamického tunelu.

Na obrázku níže (Obr. 25) je obecná metodika základních rozměrů aerodynamického tunelu. Jedná se o doporučenou minimální velikost tunelu pro simulaci, kde  $W$  a  $H$  jsou počítány na základě délky a šířky vozidla.



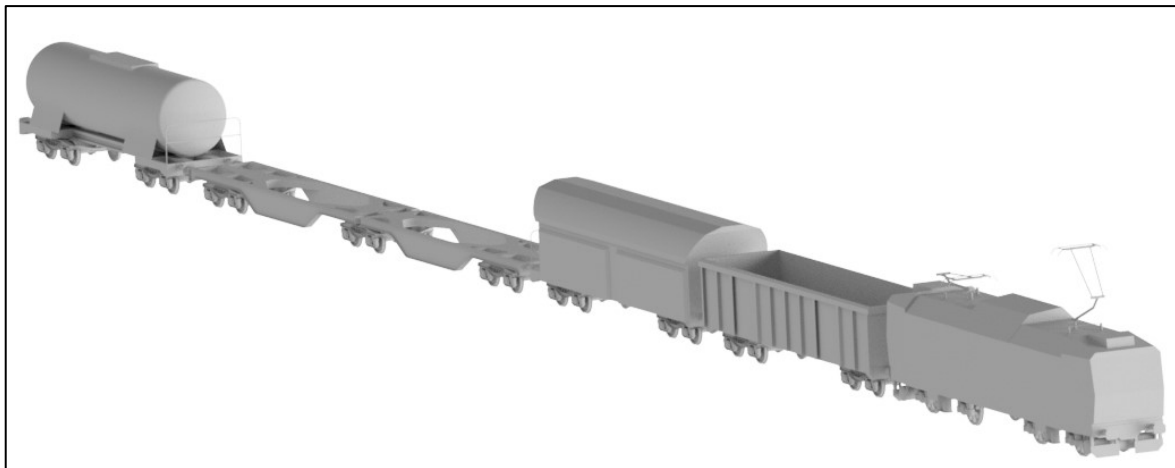
Obr. 27 Obecná metodika rozměrů aerodynamického tunelu <sup>10</sup>

Soubor 3D dat obsahuje několik vytvořených aerodynamických tunelů pro různé potřeby. Vymodelovány jsou tunely pro:

- Hnací vůz
  - Délka tunelu před vozidlem – 109200 mm
  - Délka tunelu za vozidlem – 72800 mm
  - Šířka tunelu – 30000 mm
  - Výška tunelu – 34830 mm
- Hnací vůz a jeden hnaný vůz
  - Délka tunelu před vozy – 193320 mm
  - Délka tunelu za vozy – 128880 mm
- Hnací vůz a dva hnané vozy
  - Délka tunelu před vozy – 277440 mm
  - Délka tunelu za vozy – 184960 mm
- Hnací vůz a tři hnané vozy
  - Délka tunelu před vozy – 361470 mm
  - Délka tunelu za vozy – 240980 mm
- Hnací vůz a čtyři hnané vozy
  - Délka tunelu před vozy – 445680 mm
  - Délka tunelu za vozy – 297120 mm

## 5 Realizace 3D dat a jejich ověření v simulačním programu

Knihovna součástí se skládá ze dvou lokomotiv a čtyř vozů. Každé vozidlo je sestaveno z několika součástí a sestaveno dohromady. Pro lehké skládání jsou všechny součásti vymodelovány tak, aby je bylo možno měnit a lehce sestavit dohromady. Vozidla jsou zjednodušená a upravena pro posuzování aerodynamiky vozidel (Obr. 28).

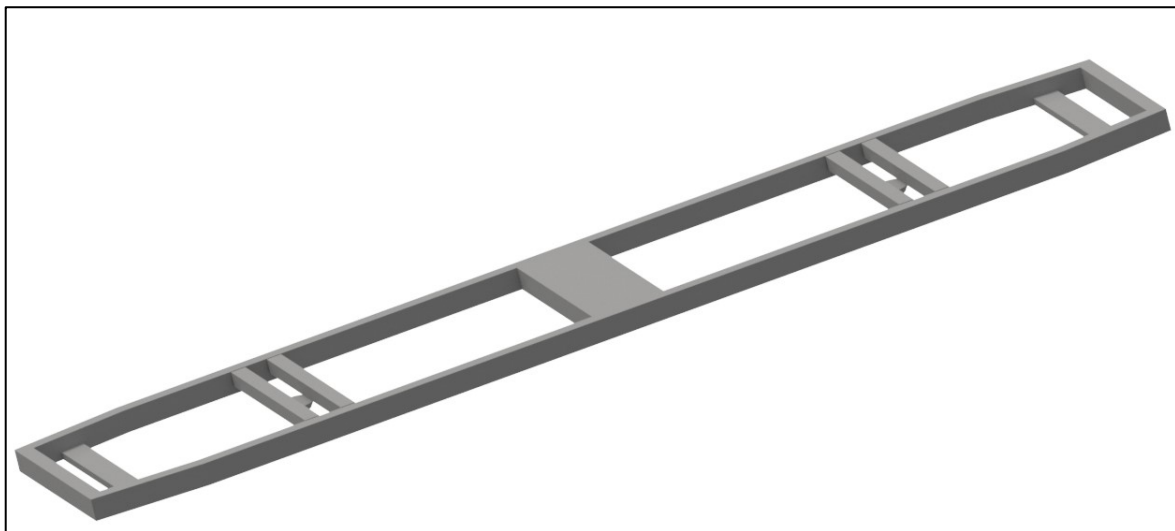


*Obr. 28 Vizualizace vymodelovaných vozidel Autor*

### 5.1 Konstrukce hnacích vozidel

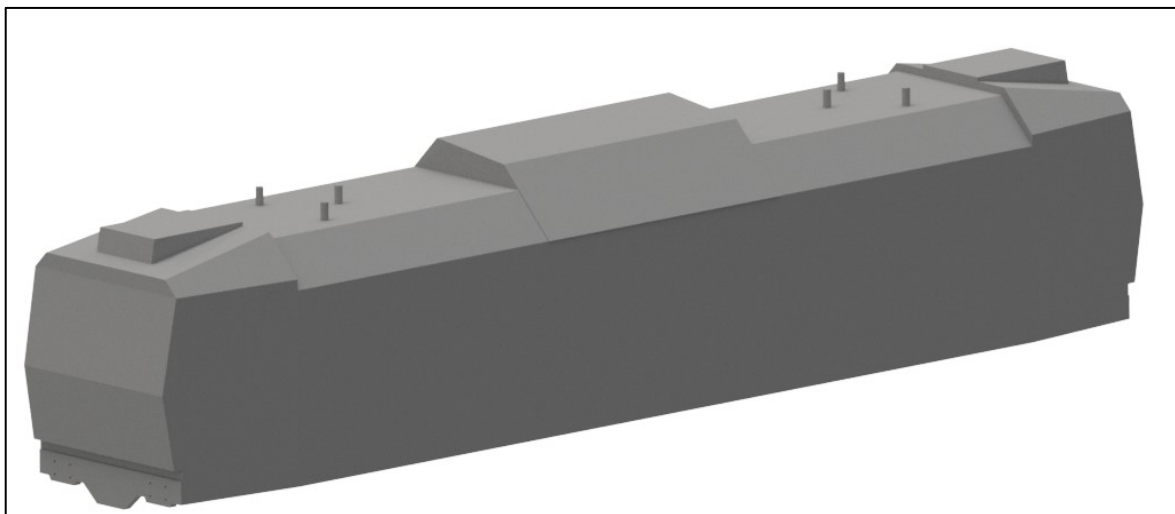
Pro lepší následné porovnávání jsem vybral dvě hnací vozidla. První vozidlo je inspirováno modelem řady 363 vyráběné firmou Škoda. Tato řada byla vyráběna jako univerzální lokomotivy pro vozbu jak osobních, tak i nákladních vlaků. Jedná se o lokomotivu s dvěma podvozky, elektrické trakce.

Lokomotiva je sestavena ze tří základních celků: rámem vozidla, pojezdem, nadstavbou a sběračem. Rám je svařovaný z ocelových profilů a tvoří jej dva podélníky a dva čelníky. Z důvodu zjednodušení nejsou vymodelovány všechny příčníky. Na rám jsou upevněny, vzduchojemy.



*Obr. 29 Model rámu hnacího vozidla 363 Autor*

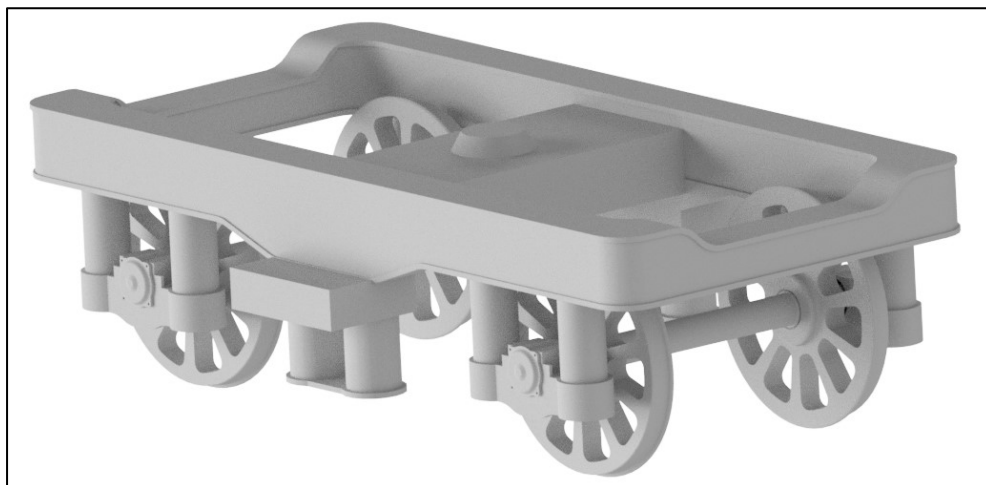
Lokomotivní skříň je tvořena kosterou, která je na bočnicích pokryta plechy s podélnými prolisy. Lokomotiva je vybavena dvěma stanovišti pro strojvedoucí a dvěma čelními okny z obou stran. Vstup na stanoviště strojvedoucího je opatřen dvěma madly pro bezpečný a jednoduchý vstup. Na čelech lokomotivy jsou umístěna světla a hlavní reflektory. Z důvodu zjednodušení nejsou tyto části zahrnuty v modelu.



*Obr. 30 Lokomotivní skříň 363 Autor*

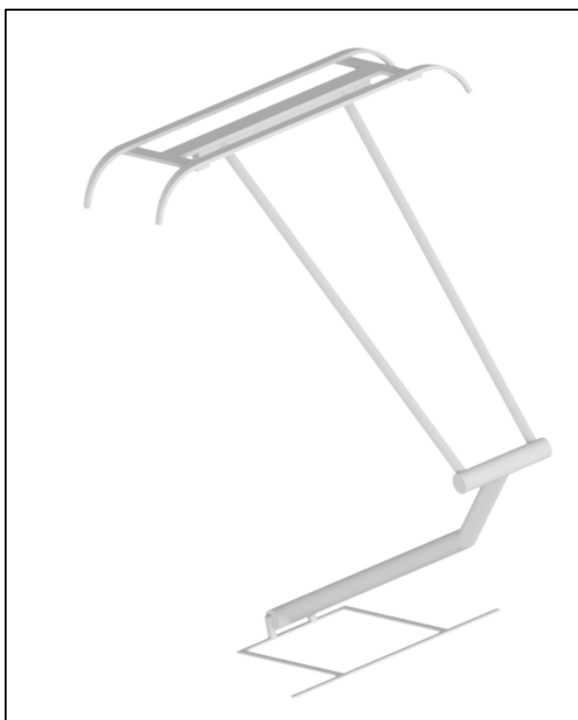
Rám s lokomotivní skříní je posazen na dvou dvounápravových pojezdech pomocí otočného čepu v každém podvozku. Pojezdy byly postupně zjednodušovány. Prvním zjednodušením bylo nahrazení primárního vinutého vypružení, válečky o stejném průměru a výšce. Dalším zjednodušením bylo nahrazení sekundárního vypružení a následné nahrazení ložiskové skříně jedním monoblokem podobného tvaru. Pojezd je tvořen rámem, který je svařovaný z ocelových profilů, pouzdem pro otočné čepy skříně, primárním a sekundárním vypružením. Dalším zjednodušením bylo vymodelování rámu pojezdu

z jedné součásti. Rám je posazen na dvě dvojkolí, které je sestaveno z kola a nápravy. Pro zjednodušení nejsou vymodelovány trakční motory, brzdový systém a hydraulické tlumiče.



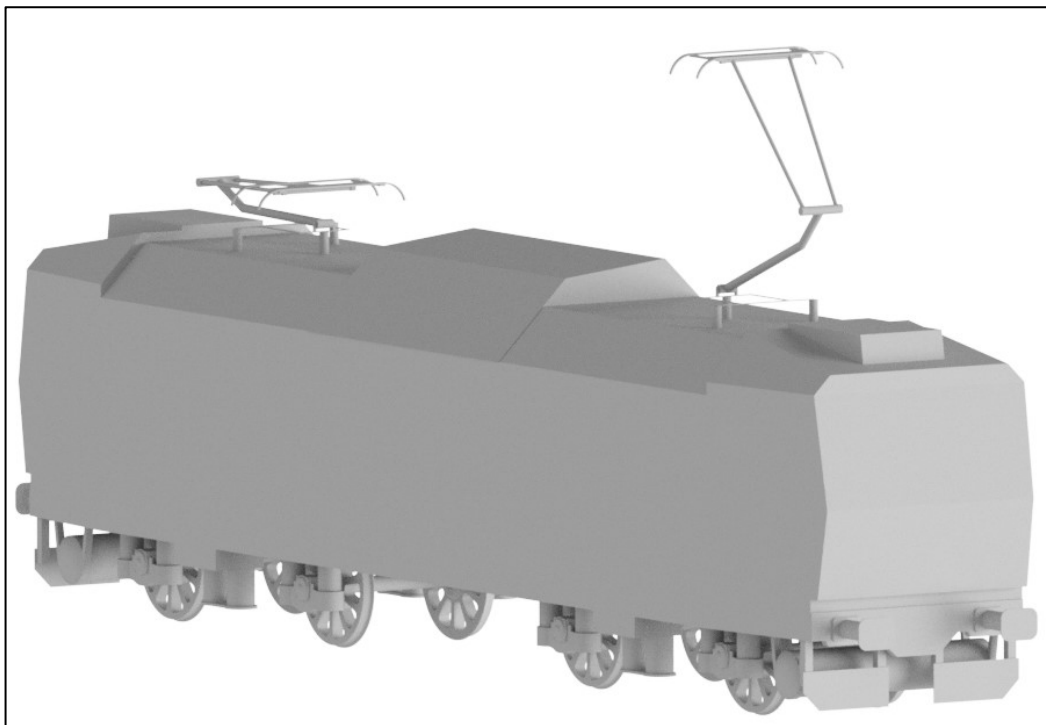
Obr. 31 Pojezd hnacího vozidla 363 <sup>Autor</sup>

Dalším zařízením na hnacím vozidle je sběrač elektrického proudu. Z důvodu malé plochy při obtékání média kolem něj, je velice zjednodušen. Vymodelovaný typ sběrače je polopantograf řady DSA 380. Model je složen ze šesti součástí a je vymodelován obecně pro všechna hnací vozidla.



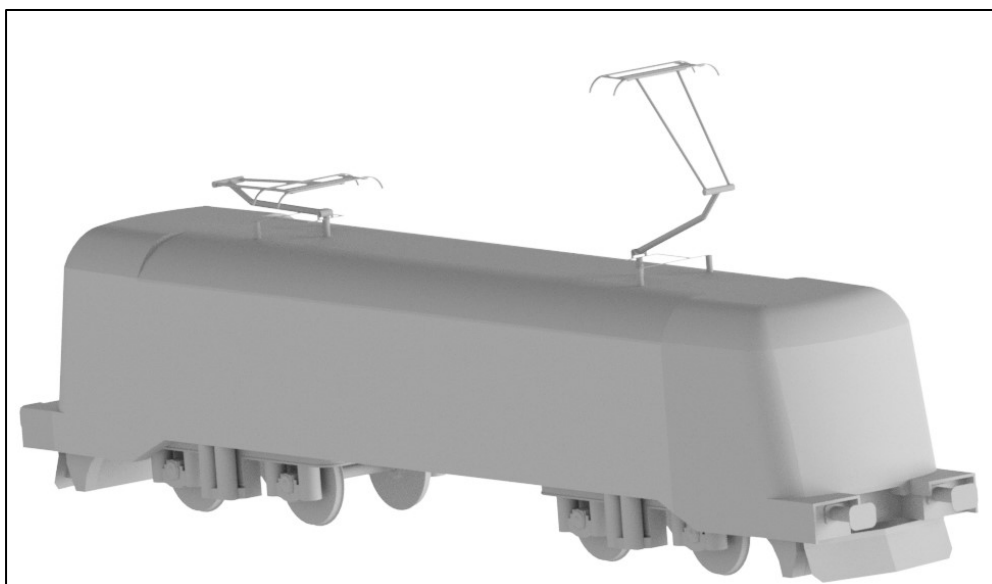
Obr. 32 Polopantograf <sup>Autor</sup>





*Obr. 33 Lokomotiva typu 363 <sup>Autor</sup>*

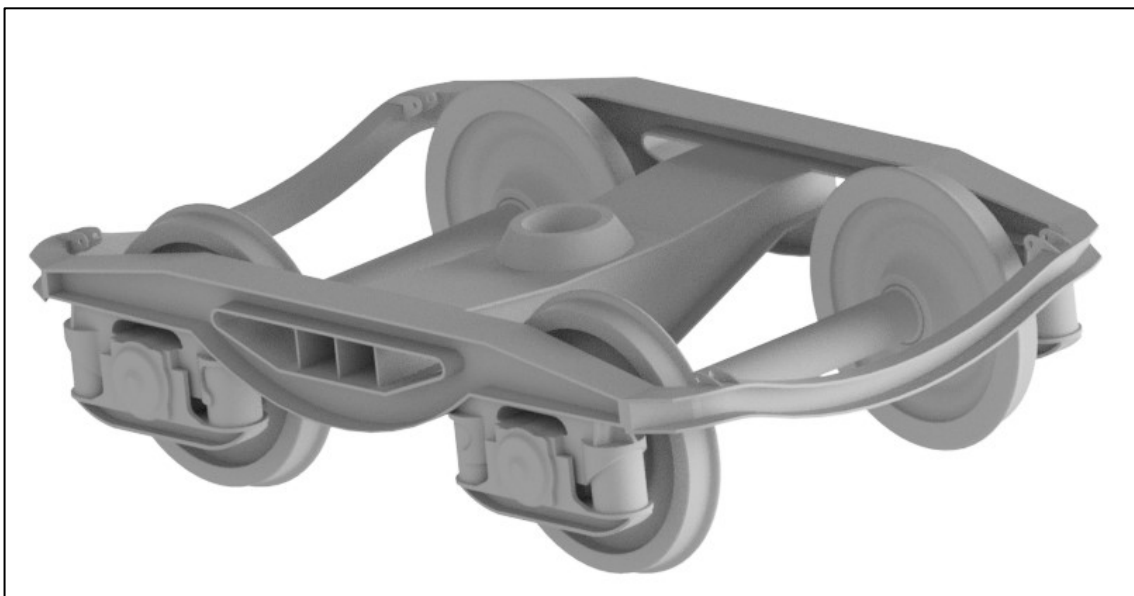
Jak už jsem zmínil výše, tak pro lepší porovnání výsledku jsou vymodelovány dvě lokomotivy. Druhá lokomotiva je typu 109e vyráběné firmou Škoda. Tato řada má modernější konstrukci a je konstruována na rychlost 200 km/h. Větší rychlost má za důsledek lépe propracovanou skříň, pro lepší obtékání vzduchu. Princip modelování je totožný s prvním hnacím vozidlem typu 363.



*Obr. 34 Lokomotiva 109e <sup>Autor</sup>*

## 5.2 Konstrukce tažených vozidel

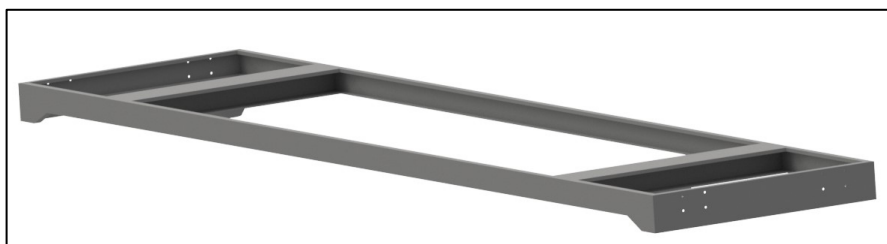
Všechna tažená vozidla jsou sestavena ze tří základních celků, pojezdu, rámu a nadstavby. Pro všechna tažená vozidla jsem vybral normalizovaný pojezd Y25, jelikož se vyskytuje nejčastěji a jsou pro něj dostupné rozměry a informace. Pojezd se skládá ze dvou podélníků a dvou čelníků svařených k sobě. Uprostřed je příčník, na kterém se nachází domek pro otočný čep (Obr. 35). Primární vypružení jsem nahradil válečky o stejném průměru a výšce. Dalším zjednodušením je úplné vynechání brzdového systému.



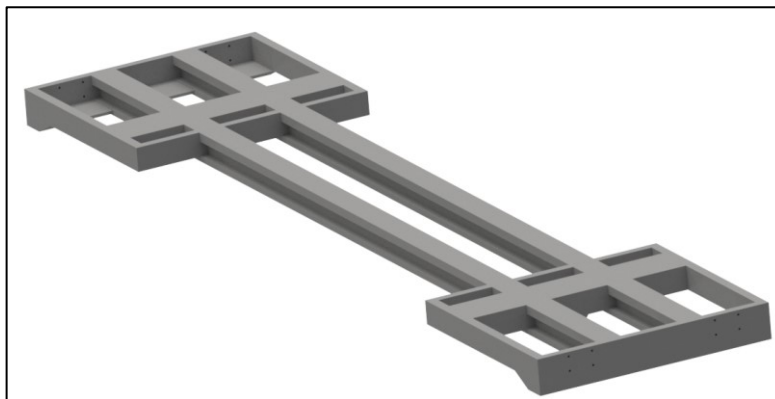
Obr. 35 Pojezd Y25 *Autor*

### 5.2.1 Rám vozů

Rám vozů je zjednodušen a koncipován pro lepší modularitu součástí. Zjednodušený rám se oproti realitě skládá jen z jedné části. Pro všechny vozy jsou vymodelovány obecné rámy stejné konstrukce, ale s rozdílnými délkami nebo úpravami (Obr. 36).

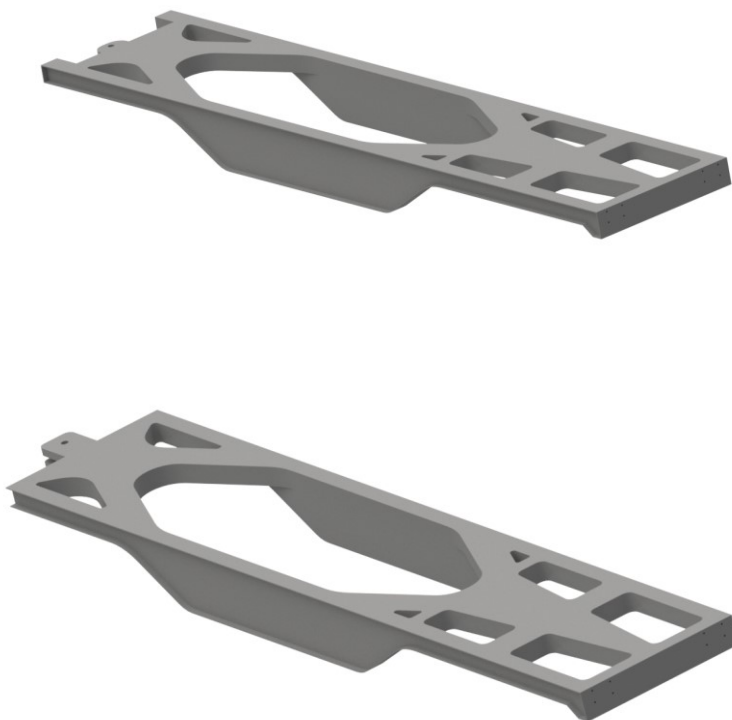


Obr. 36 Rám vysokostěnného vozu *Autor*



Obr. 37 Rám kotlového vozu <sup>Autor</sup>

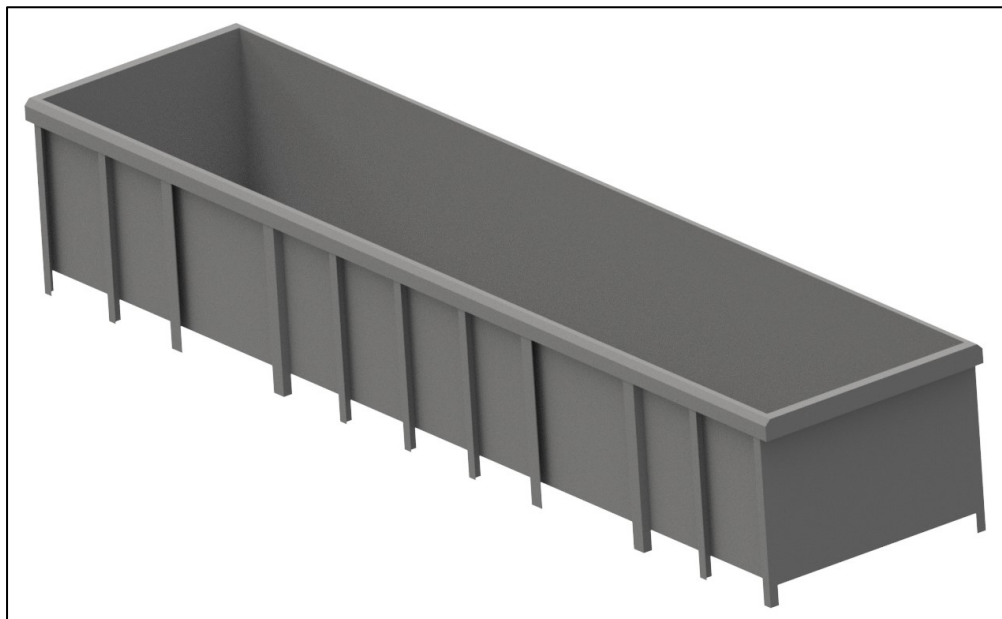
Rozdílný rám je pro plošinový vůz Sggrss. Tento šesti nápravový vůz má speciální rám pro přepravu kontejnerů. Je proveden jako kloubový a skládá se ze dvou článků, na každý článek je možné naložit jeden 40ft nebo dva 20ft kontejnery. Články jsou spojeny pomocí kloubového spojení typu Talbot (Obr. 38).



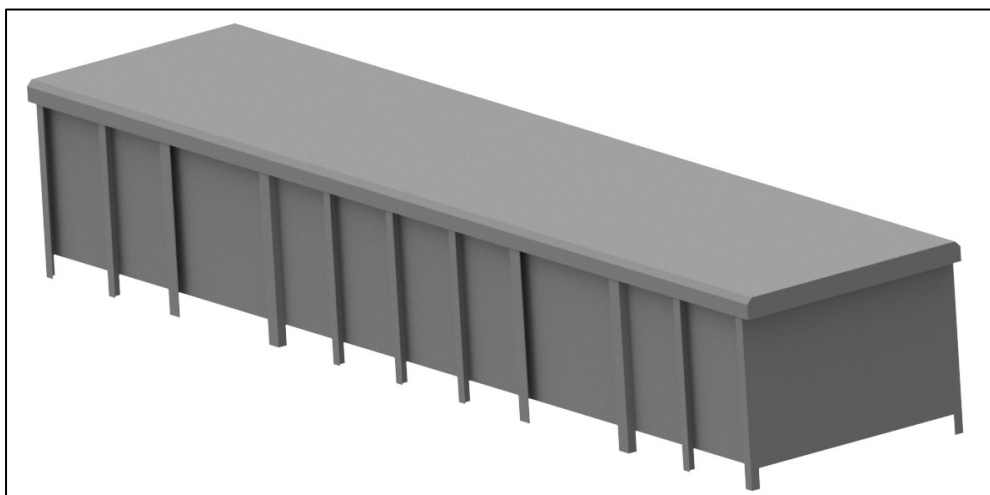
Obr. 38 Článek A a B plošinového vozu <sup>Autor</sup>

### 5.2.2 Konstrukce nástavby vozidel

Pro každý jednotlivý vůz jsem vymodeloval nástavbu. Pro vysokostěnný vůz jsou vymodelovány dvě nástavby, jedna simuluje prázdný vůz (Obr. 39) a druhá plně naložený vůz (Obr. 40). Nástavba vysokostěnného vozu je složená z rámu podlahy, plechové podlahy a dvou čelních a bočních stěn.



*Obr. 39 Nástavba vysokostěnného vozu prázdná <sup>Autor</sup>*

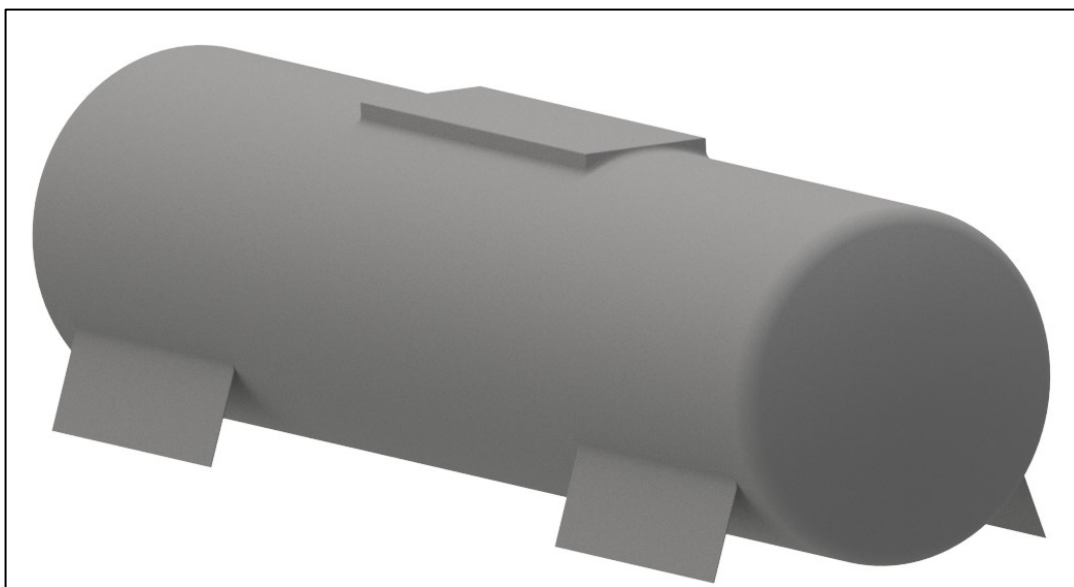


*Obr. 40 Nástavba vysokostěnného vozu plně ložená <sup>Autor</sup>*

Mezi další vymodelované nástavby patří nástavba pro kotlový vůz a výsypný vůz. Pro tyto vozy jsou vymodelovány další prvky, jako jsou například zábradlí (Obr. 41). Zábradlí ve výpočtech nebude zahrnuto, z důvodu malého vlivu na aerodynamiku vozidla.

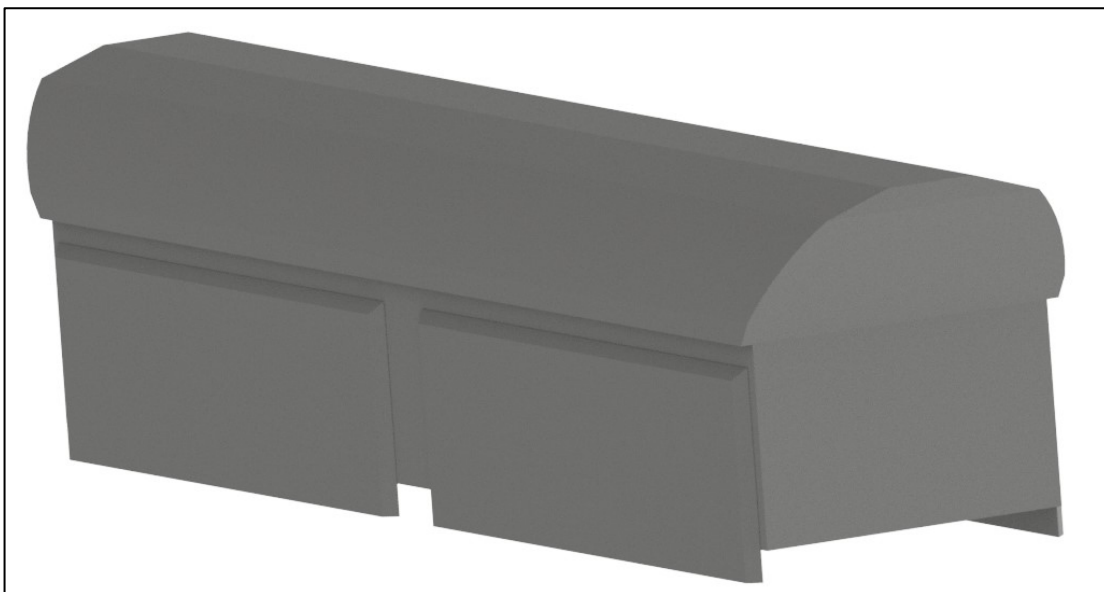


*Obr. 41 Kotlový vůz detail na zábradlí vozu <sup>Autor</sup>*



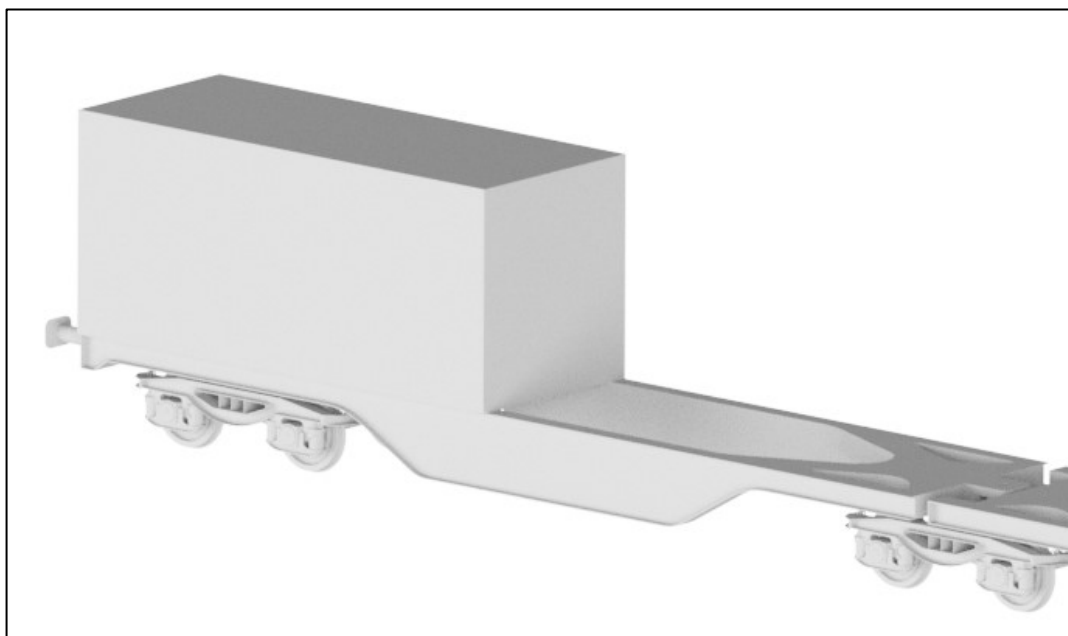
*Obr. 42 Nástavba kotlového vozu <sup>Autor</sup>*

Nástavba výsypného vozu je určena zejména pro přepravu uhlí, koksu a jiných sypkých materiálů, z tohoto důvodu má v každé boční stěně umístěny dvě klapky, které mohou být ovládány ručně nebo také pneumaticky.



*Obr. 43 Nástavba výsypného vozu <sup>Autor</sup>*

Jako nástavbu pro plošinový vůz jsem vymodeloval dva typy kontejnerů. První kontejner 40ft a druhý 20ft. Tyto kontejnery jsou reprezentovány jednoduchou konstrukcí a pro mé potřeby postačí jednoduché modely obdélníků správných rozměrů.

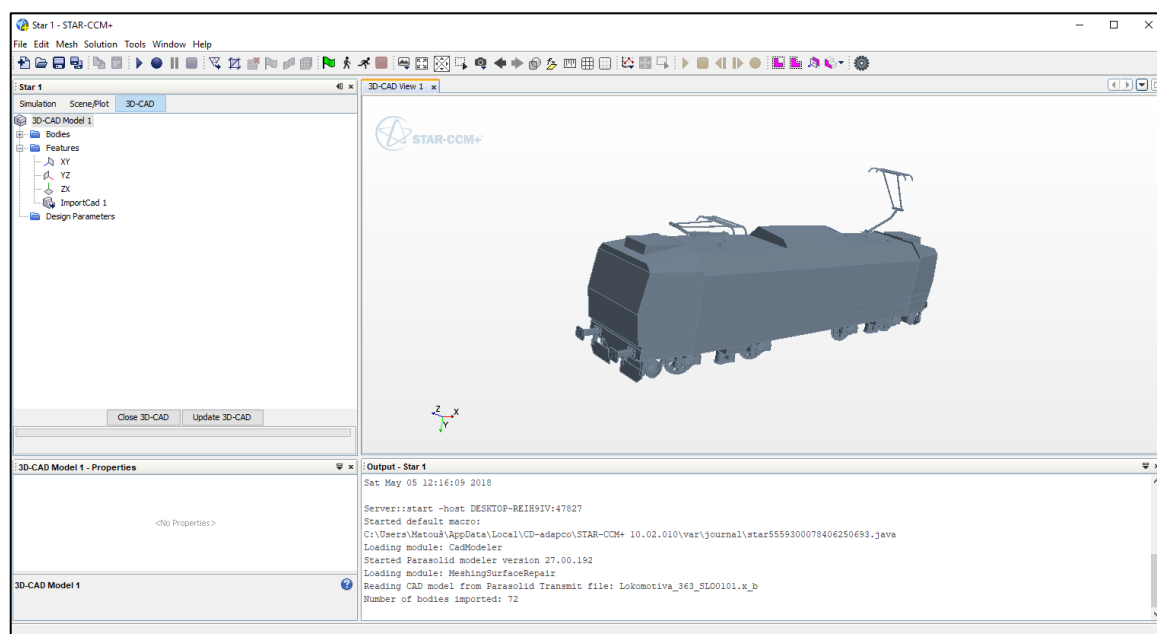


*Obr. 44 Plošinový vůz s 20ft kontejnerem <sup>Autor</sup>*

## 5.3 Ověření dat v simulačním prostředí

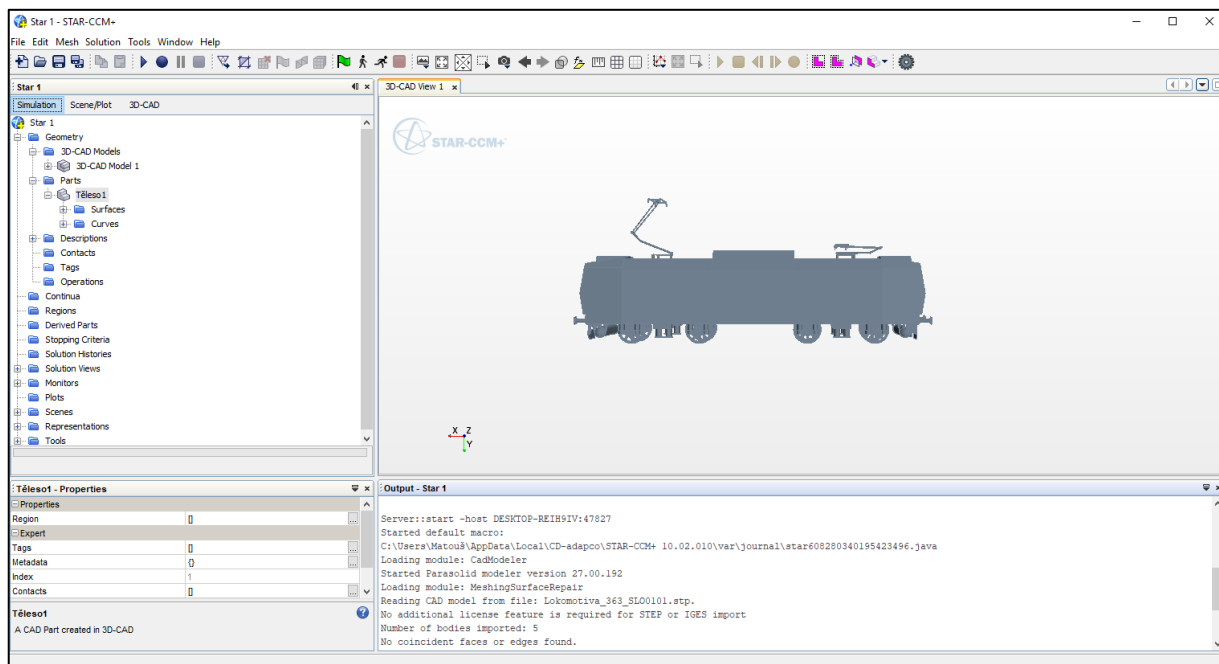
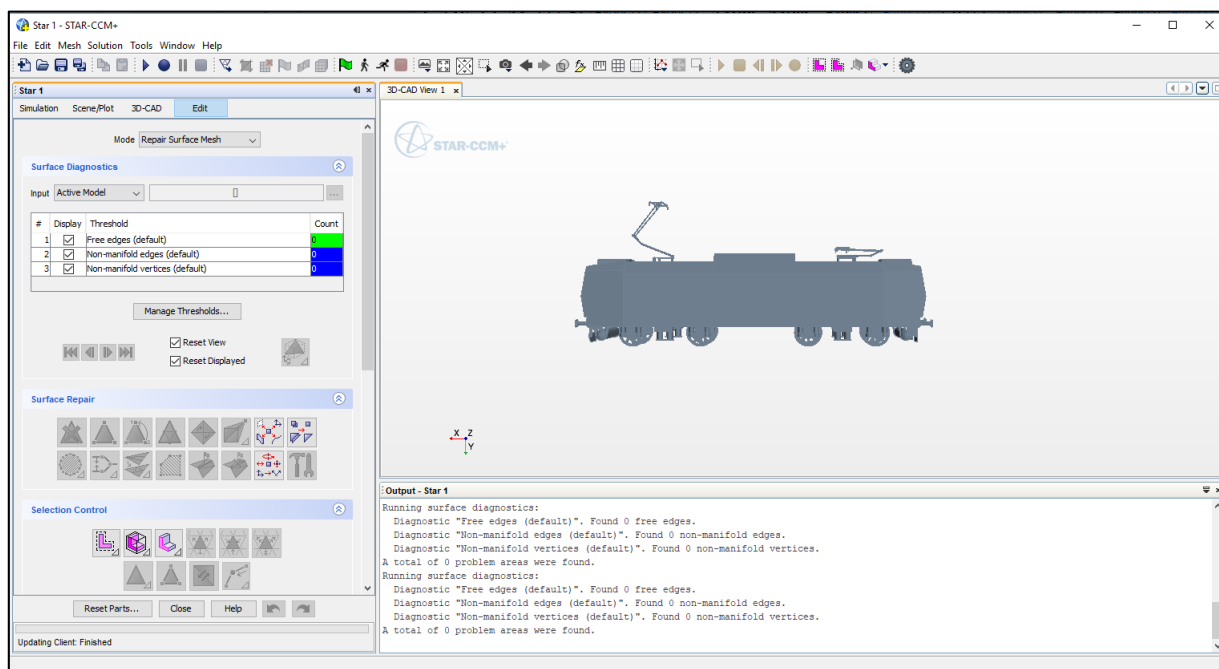
### 5.3.1 Import modelů do simulačního programu

Jak bylo uvedeno v druhé kapitole, základní zjednodušené celky jako jsou rámy, nástavby a podvozky vozidel, byly pro účel ověření v simulačním programu, exportovány v kompatibilním formátu .x\_b (Obr. 45). Tento formát se ukázal být vhodným až po převedení na starší verzi a pouze pro celé sestavy. Po nahrání byla geometrie modelu převedena na početnou soustavu ploch a těles. I přes aplikovaná zjednodušení se model ukázal být příliš výpočetně náročný. Dalším problémem byla konstrukce vozidel, bylo objeveno větší množství chyb a nespojených hran, s kterými si program neuměl poradit. Musel jsem provést několik dílčích úprav jednotlivých dat.



Obr. 45 Importovaný model hnacího vozidla v programu STAR-CCM+ Autor

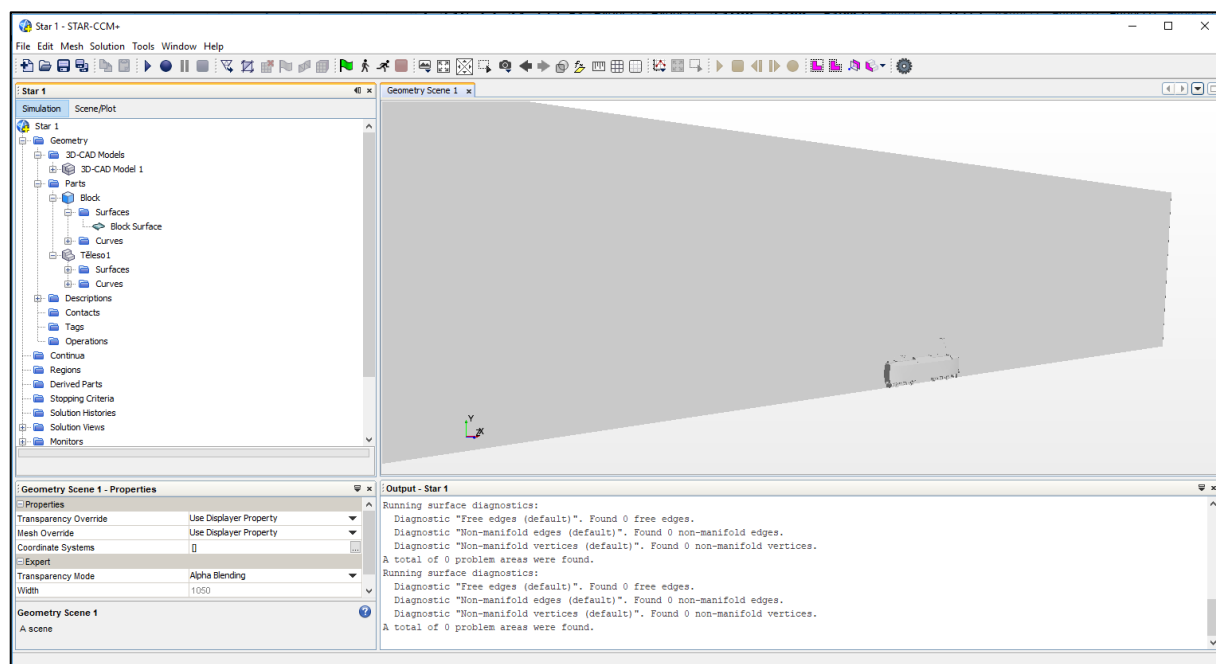
První úpravy spočívaly v tom, že jsem sestavu vozidel převedl v jeden solidní blok neboli v jednu součást. Jelikož si program neuměl poradit s původním formátem parasolid, tak jsem součásti následně exportoval do formátu step. Dalším krokem po importování geometrie je zkontrolování dat na neuzavřené hrany, nespojené součásti apod. Po nahrání geometrie se model převede na několik partu, z nichž každý part má své plochy a křivky. Party jsem následně složil dohromady a stejný postup jsem aplikoval také na plochy a křivky (Obr. 46). Takhle připravená data jsem zkontroloval pomocí funkce repair surface, tímto způsobem je model zkontrolován na volné hrany, kolidující hrany a neexistující hrany (Obr. 47).

Obr. 46 Spojení partu v simulačním programu *Autor*Obr. 47 Kontrola modelu na volné hrany a nedostatky *Autor*



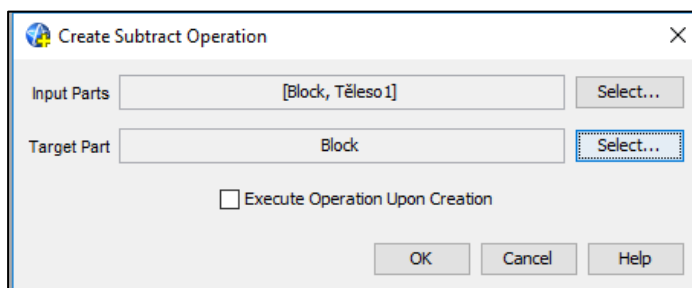
### 5.3.2 Tvorba simulačního prostředí

Jelikož simulace proudění vzduchu probíhá v uzavřeném prostředí (větrném tunelu), musí být i výpočetní plocha ohraničena. Tunel lze vytvořit několika způsoby. Prvním způsobem je vytvoření tunelu v samotné simulační aplikaci. Druhým způsobem je vytvoření tunelu v jiném programu a následně jej importovat do simulačního programu. Jak už jsem zmínil výše knihovna obsahuje 5 vymodelovaných tunelů pro různý počet vozidel. Při tvorbě simulace jsem použil prvotní způsob, jelikož pro ověření funkčnosti modelů postačí 2D simulace (Obr. 48).

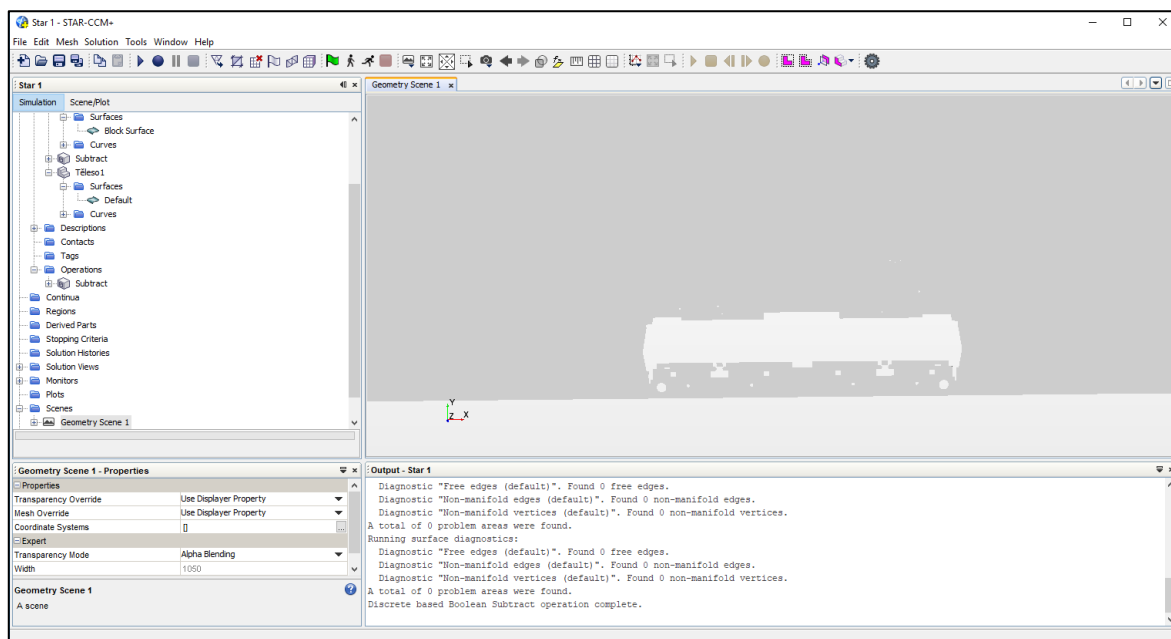


Obr. 48 Vytvoření tunelu v simulačním programu *Autor*

V další fázi jsem nahradil geometrii hnacího vozidla jinou. Z objemu tunelu byl odečten objem hnacího vozidla, pomocí funkce Subtract, ve kterém byl vybrán model vozidla a model tunelu (Obr. 49). Cílový model byl vybrán model tunelu (Obr. 50).



Obr. 49 Operace subtract *Autor*

Obr. 50 Finální výsledek subtractu *Autor*

Jak lze vidět z obrázku, pro 2D simulaci mohou být odstraněny některé konstrukční celky např. sběrač elektrického proudu, který má zanedbatelný vliv na aerodynamiku.

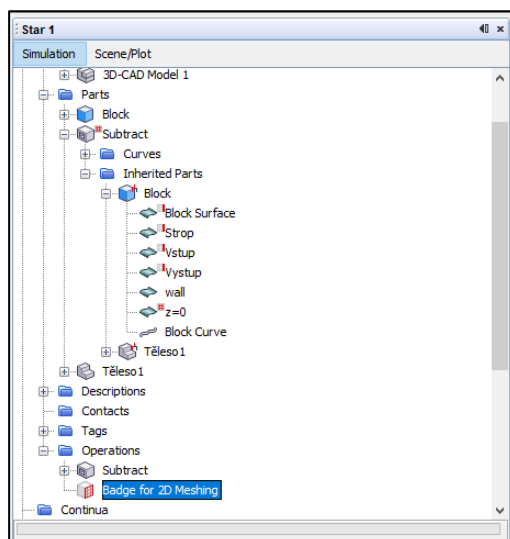
### 5.3.3 Vytvoření objemové sítě

Dalším krokem bylo vytvoření objemové sítě. Aby bylo možné vytvořit síť, musí se nejprve určit okrajové podmínky neboli vstup média do tunelu, výstup a určení pevných zdí tunelu (Tab. 1).

Tab. 1 Okrajové podmínky *Autor*

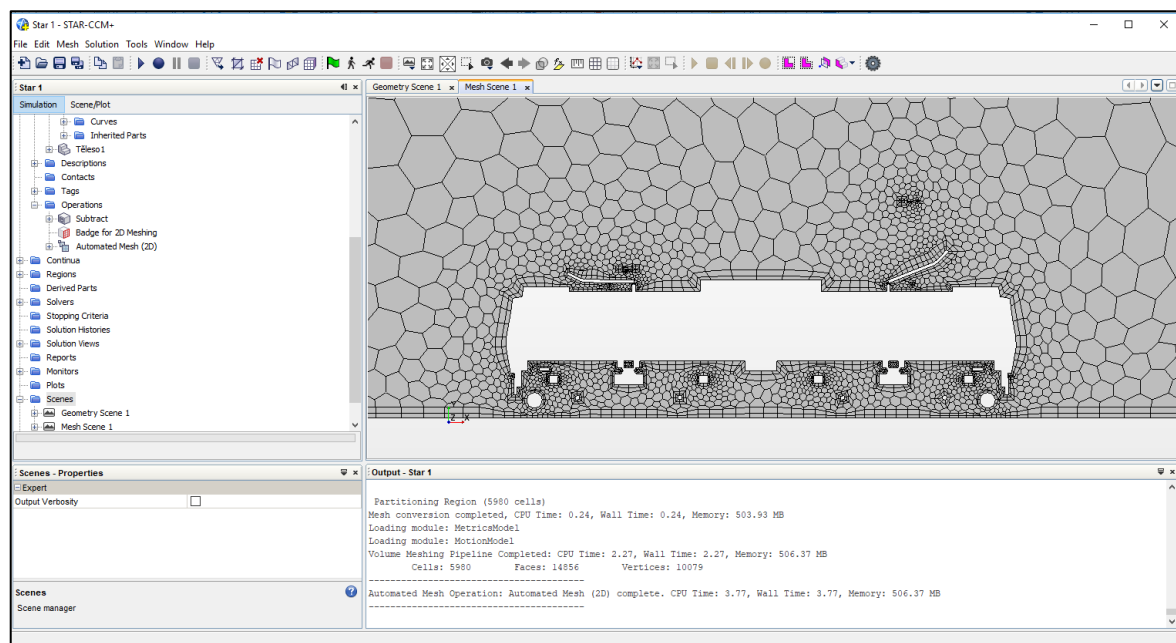
Název plochy	Typ plochy
Vozidlo	Pevná plocha bez vlastností (wall)
Podlaha	Pevná plocha bez vlastností (wall)
Vstup	Vstup proudění média (Velocity inlet)
Výstup	Výstup proudění média (Pressure outlet)
Stěna a strop	Volné prostředí (symmetry plane)
Rovina symetrie ( $z=0$ )	Rovina symetrie vozidla

Prvním kontrolním znakem při správném určení okrajových podmínek je vytvoření symbolu kostky u roviny symetrie ( $z=0$ ) (Obr. 51).



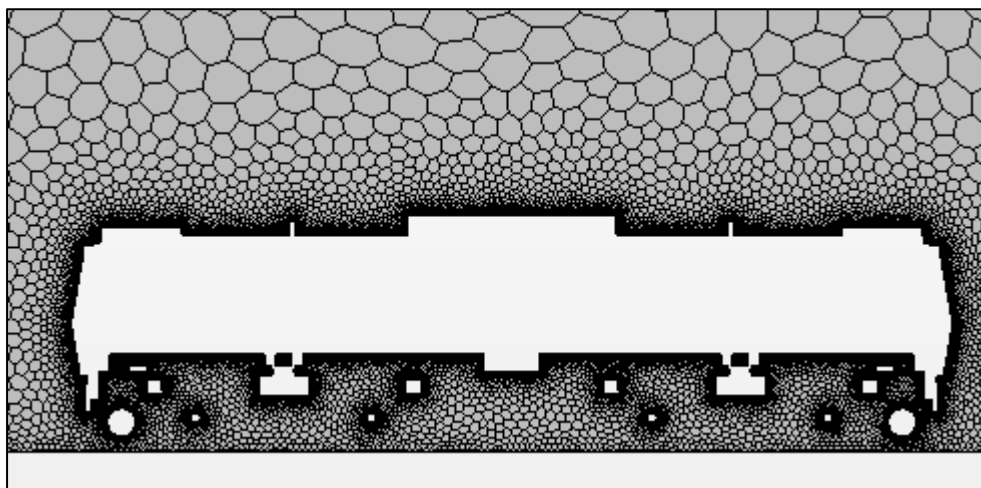
Obr. 51 Kontrola správnosti určení okrajových podmínek *Autor*

Dále přiřadíme vstup a výstup média a vytvoříme síť. Při vytváření sítě zvolíme polygonální síť a prismatické vrstvy (Obr. 51).



Obr. 52 Vytvoření sítě v simulačním programu *Autor*

Vytvořená síť se dále může upravit např. počtem a rozměry prismatických vrstev (Obr. 53). Síť je okolo vozidla jemnější a má menší rozměr oka sítě. Pro zjemnění sítě lze použít více možností. První možností je, že jednotlivé segmenty sítě na ploše vozidla budou mít menší velikost oproti rozměrům tunelu. Druhým způsobem je dodatečné přidání oblasti, ve které zjemníme síť pouze pro sledování určitých problémů. Tímto výpočtem jsem potvrdil a zkontroloval funkčnost všech součástí databáze knihovny.



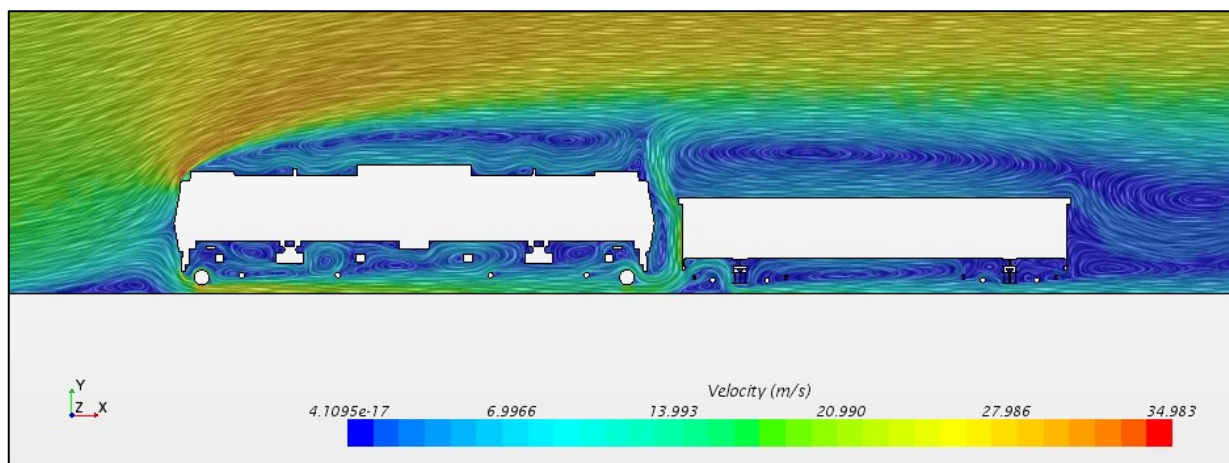
*Obr. 53 Úprava počtu prismatických vrstev Autor*

#### 5.3.4 Nastavení modelu

Dalším krokem ke zjištění funkčnosti dat bylo provedení jednoduchého výpočtu. Byly definovány vstupní podmínky pro proudění vzduchu. Při postupu výběru parametrů proudění bylo postupováno podle doporučení výrobce simulačního programu. Zvolené parametry proudění jsou popsány v tabulce (Tab. 2). Dále jsem předepsal podmínky pro ukončení simulace. Maximální počet výpočtových kroků na 1000 pro ověření funkčnosti a následně na 2000, kdy se pozorované hodnoty daly považovat za ustálené.

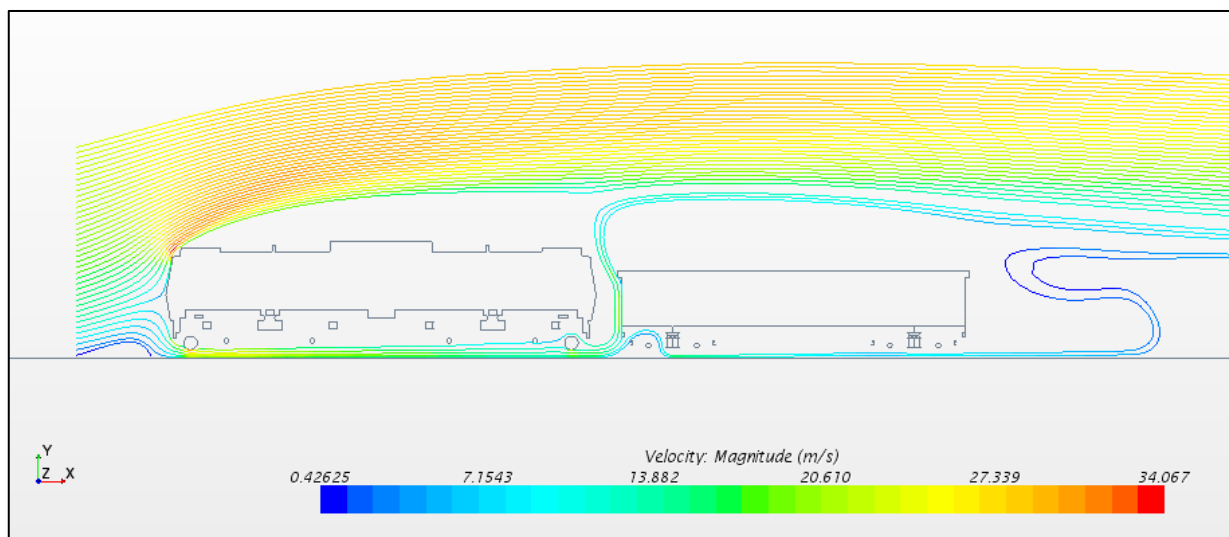
*Tab. 2 Fyzikální modely zvolené pro simulaci Autor*

Typ zvoleného parametru
Ustálené proudění (steady)
Proudící médium – plyn (gas)
Nestlačitelné proudění (constant density)
Turbulentní proudění
Turbulentní proudění podle modelu K-omega
Rychlost proudění vzduchu – 80 km/h



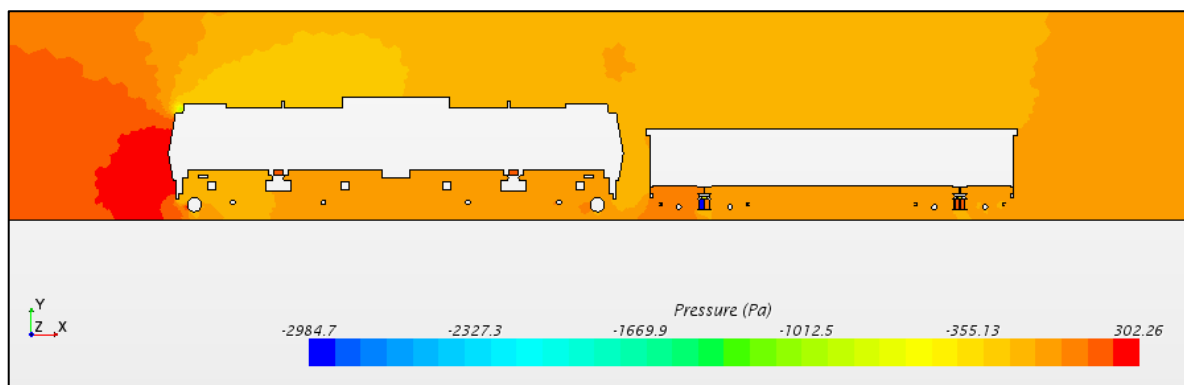
Obr. 54 Zobrazení rychlosti proudění při vstupní rychlosti 80 km/h a tvořící se víry *Autor*

Proudnice na následujícím obrázku (Obr. 55) názorně ukazují, jakým směrem a jakou rychlostí proudí vzduch okolo vozidla. Dále si můžeme všimnout tvořícího se úplavu za vozidlem v důsledku obtékání vzduchu.

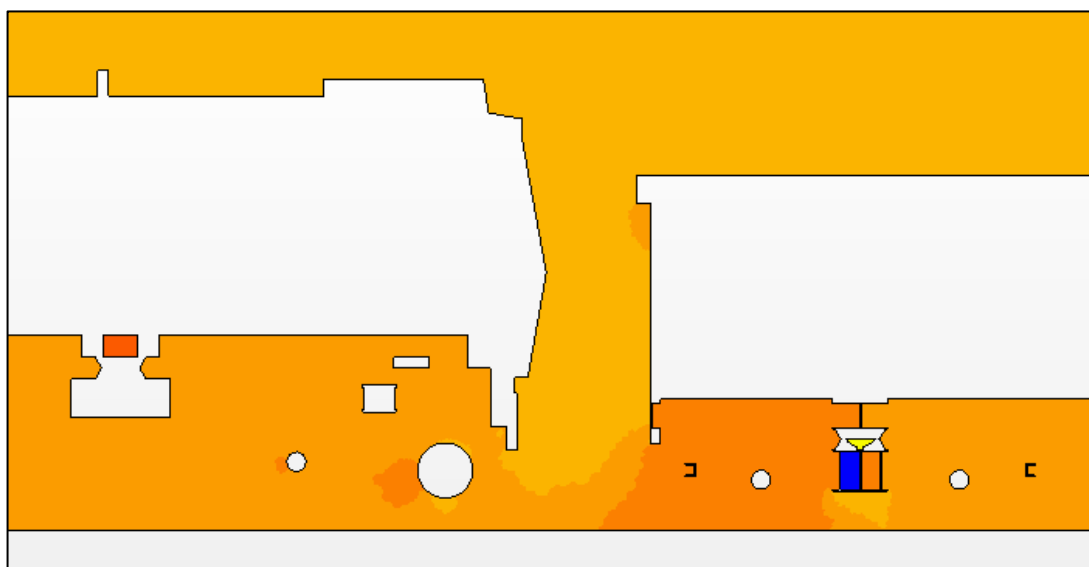


Obr. 55 Proudnice zobrazené okolo soupravy při rychlosti 80 km/h *Autor*

Na následujícím obrázku (Obr. 56) lze vidět rozložení tlaku působící na soupravu. Také si lze všimnout uzavřených míst v místech pojezdu (Obr. 57), z toho důvodu by měly být použity jednodušší pojezdy, hlavně v oblasti příčníků pro 2D simulaci.



Obr. 56 Rozložení tlaku na soupravě *Autor*



Obr. 57 Oblast přetlaku v příčniku pojezdu *Autor*

## 6 Zhodnocení a doporučení

Celou bakalářskou práci lze rozdělit do několika částí. V první části je teoreticky rozebrána a vysvětlena problematika kolejových vozidel, mechanika pohybu vozidel, základní termíny z mechaniky tekutin a popis vybraných konstrukčních celků, které mají vliv na aerodynamiku vozidel. V mechanice pohybu vozidel je blíže popsána problematika odporu, konkrétně valivého a aerodynamického odporu. Traťové odpory jsou pouze zmíněny, a to z důvodu zaměření práce na aerodynamiku vozidla. Byly vybrány základní konstrukční celky důležité při posuzování aerodynamiky vozidel, jejich teoretický popis a určení vybraných vozidel použitých v práci. Práce obsahuje rozsáhlou knihovnu součástí, a to jak prokreslených součástí, tak také zjednodušených pro zkoumání aerodynamických odporů.

Všechny součásti byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor. Byly vytvořeny celkem dvě hnací vozidla, čtyři hnaná vozidla a čtyři základní aerodynamické tunely. Vozidla byla vymodelována podle skutečných rozměrů, a to buď z typových výkresů nebo z naměřených hodnot reálného vozidla. Z důvodů vysokých výpočetních nároků byly sestavy vozidel zjednodušeny. Došlo k nahrazení vinutého vypružení pomocí základních válečků, ke kompletnímu nahrazení brzdového systému, zjednodušení modelu sběrače elektrického proudu a k zjednodušení tvaru kola. Byla provedena modularita součástí a zobecnění konstrukčních celků za možnosti jednoduchého skládání součástí. Byla navržena obecná metodika skládání součástí.

Všechny modely byly odzkoušeny v simulačním programu STAR-CCM+ pro základní 2D simulaci. Detailní sestavy byly nahrazeny a převedeny v jednotnou součást pro spojení volných a kolidujících hran. Byly nastaveny základní okrajové podmínky pro vstup a výstup média a vytvoření základní objemové sítě. Dále byla použita základní 2D simulace a upravení počtu prismatických vrstev. Tento postup byl proveden na všechny modely pro ověření funkčnosti databáze dat. Byl vytvořen fyzikální model a proběhly výpočty pro zjištění proudění vzduchu.

Část výpočetní simulace obtékání vzduchu je velice důležitá, a to jak z konstrukčního hlediska pro zvyšování rychlosti vozidel, tak také z ekonomického hlediska. Z tohoto důvodu byla vytvořena databáze součástí pro řešení simulací aerodynamiky vozidel. Pro další výpočty ve 2D simulaci doporučuji provést zjednodušení a úpravy. Například zrušení některých konstrukčních celků jako jsou, sběrače elektrického proudu nebo zjednodušení pojezdů u tažených vozidel. Dále doporučuji řídit se mou metodikou skládání součástí nebo využití už předem složených sestav vozidel pro snazší vkládání do simulačního programu.

## 7 Závěr

Cílem práce bylo vytvoření souboru 3D dat kolejových vozidel za účelem posuzování aerodynamických vlastností a jejich ověření v simulačním prostředí.

Všechny modely byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor. Tato aplikace je vhodná pro komplexně a detailně zpracované modely. Byla vytvořena knihovna součástí, ze kterých se dá složit dvě hnací vozidla přesněji hnací vozidlo typu 363 a 109E. Dále byly vytvořeny součásti pro čtyři tažená vozidla přesněji vysokostěnný, kotlový, plošinový a výsypný vůz. Vzhledem k velkým výpočetním nárokům vybraného simulačního programu STAR-CCM+, musela být aplikována některá zjednodušení. Pro zjišťování aerodynamických vlastností určitých součástí, a ne celých sestav, byly také ponechány součásti bez úprav.

Všechna vozidla jsou vymodelována podle reálného měřítka. Čerpal jsem z volně dostupných typových výkresů nebo měření v praxi na reálných vozidlech. Pro ověření funkčnosti dat v simulačním programu byly složité sestavy vozů převedeny na jednu součást, a to z důvodu vysokých nároků na výpočetní výkon.

Dále byla navržena metodika skládání součástí pro jednoduché používání dat. Byla využita modularita dat, které lze jednoduše složit nebo doplnit o další modely.

Závěrem jsem na všech sestavách vozidel provedl základní 2D výpočet proudění vzduchu v simulačním programu STAR-CCM+ pro odzkoušení funkčnosti vymodelovaných dat. Dospěl jsem k názoru, že i přes větší složitost mnou navržených modelů je lze jednoduše a univerzálně aplikovat pro další zkoumání aerodynamických vlastností, a to jak celých sestav, tak také jednotlivých součástí.



---

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Pavlovi Dreslerovi za jeho odborné rady, nápady a připomínky, které byly přínosem k vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaromíru Širokému, Ph.D. za ochotu při odborných konzultacích.

## Seznam použité literatury

1. ŠIROKÝ, Jaromír a kol. Stavba železničních kolejových vozidel. Dostupné z: [https://issuu.com/michdor/docs/m10\\_text](https://issuu.com/michdor/docs/m10_text).
2. ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě I: kolejová vozidla*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0536-7.
3. ŠILAR, Josef. *Aerodynamické parametry nákladních vozidel* [online]. Brno, 2013 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/27007>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Petr Hejtmánek.
4. RŮŽIČKA, Tomáš. *Jízdní odpor nákladních vlaků* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/109485>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Vedoucí práce Jaromír Široký.
5. ČD Cargo, a.s [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: [www.cdcargo.cz](http://www.cdcargo.cz)
6. MITYSKA, Marcel. *Tažné a narážecí ústrojí* [online]. 2012. 22 [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.strojarina.jecool.net/wp-content/uploads/Data/MZV/Tažné%20a%20narážecí%20ústrojí.pdf>
7. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Sb%C4%9Bra%C4%8D\\_proudu](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sb%C4%9Bra%C4%8D_proudu)
8. *Railway Technology* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://www.railway-technology.com/products/y25-bogie/>
9. *Vagony* [online]. [cit. 2018-02-11]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz>
10. Návod pro program STAR-CCM+
11. Kozubková, Milada: *Modelování proudění tekutin*, FLUENT, CFX. Ostrava: Elektronické skriptum VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. 153s

## Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Příklady uspořádání pojezdu žel. vozidel <sup>1</sup> .....	12
Obr. 2 Schéma působení sil <sup>3</sup> .....	16
Obr. 3 Laminární proudění <sup>2</sup> .....	18
Obr. 4 Turbulentní proudění <sup>2</sup> .....	18
Obr. 5 Mezní vrstva a rychlostní profil proudící kapaliny na desce <sup>2</sup> .....	19
Obr. 6 Aerodynamický tunel s otevřeným systémem <sup>3</sup> .....	21
Obr. 7 Aerodynamický tunel s uzavřeným systémem <sup>3</sup> .....	21
Obr. 8 Porovnání výsledků jednotlivých matematických modelů v čase <sup>3</sup> .....	22
Obr. 9 Vymodelovaný vůz Eas_52 <sup>Autor</sup> .....	23
Obr. 10 Škoda E499.1 (363) <sup>4</sup> .....	24
Obr. 11 Škoda 109E (380) <sup>4</sup> .....	25
Obr. 12 Trubkový nárazník <sup>5</sup> .....	26
Obr. 13 Pantograf tramvaje typu T3 <sup>6</sup> .....	27
Obr. 14 Polopantograf jednotky řady 680 <sup>6</sup> .....	27
Obr. 15 Pojezd podvozkového vozu typu Y25 <sup>7</sup> .....	28
Obr. 16 Rám podvozkového vozu <sup>8</sup> .....	29
Obr. 17 Vysokostěnný vůz typu Eas-52 <sup>4</sup> .....	30
Obr. 18 Plošinový vůz typu Sggrss 55 <sup>4</sup> .....	30
Obr. 19 Kotlový vůz Zacns <sup>4</sup> .....	31
Obr. 20 Výsypný vůz Falns <sup>4</sup> .....	31
Obr. 21 Sestavení výsypného vozu <sup>Autor</sup> .....	33
Obr. 22 Sestavení vysokostěnného vozu <sup>Autor</sup> .....	33
Obr. 23 Umístění čepového domku na rámu <sup>Autor</sup> .....	34
Obr. 24 Umístění čepového domku na podvozku <sup>Autor</sup> .....	34
Obr. 25 Umístění středu souřadnicového systému pojezdu <sup>Autor</sup> .....	35
Obr. 26 Umístění středu souřadného systému vozů <sup>Autor</sup> .....	36
Obr. 27 Obecná metodika rozměrů aerodynamického tunelu <sup>9</sup> .....	37
Obr. 28 Vizualizace vymodelovaných vozidel <sup>Autor</sup> .....	38
Obr. 29 Model rámu hnacího vozidla 363 <sup>Autor</sup> .....	39
Obr. 30 Lokomotivní skříň 363 <sup>Autor</sup> .....	39
Obr. 31 Pojezd hnacího vozidla 363 <sup>Autor</sup> .....	40
Obr. 32 Polopantograf <sup>Autor</sup> .....	40
Obr. 33 Lokomotiva typu 363 <sup>Autor</sup> .....	41

Obr. 34 Lokomotiva 109e <sup>Autor</sup> .....	41
Obr. 35 Pojezd Y25 <sup>Autor</sup> .....	42
Obr. 36 Rám vysokostěnného vozu <sup>Autor</sup> .....	42
Obr. 37 Rám kotlového vozu <sup>Autor</sup> .....	43
Obr. 38 Článek A a B plošinového vozu <sup>Autor</sup> .....	43
Obr. 39 Nástavba vysokostěnného vozu prázdná <sup>Autor</sup> .....	44
Obr. 40 Nástavba vysokostěnného vozu plně ložená <sup>Autor</sup> .....	44
Obr. 41 Kotlový vůz detail na zábradlí vozu <sup>Autor</sup> .....	45
Obr. 42 Nástavba kotlového vozu <sup>Autor</sup> .....	45
Obr. 43 Nástavba výsypného vozu <sup>Autor</sup> .....	46
Obr. 44 Plošinový vůz s 20ft kontejnerem <sup>Autor</sup> .....	46
Obr. 45 Importovaný model hnacího vozidla v programu STAR-CCM+ <sup>Autor</sup> .....	47
Obr. 46 Spojení partu v simulačním programu <sup>Autor</sup> .....	48
Obr. 47 Kontrola modelu na volné hrany a nedostatky <sup>Autor</sup> .....	48
Obr. 48 Vytvoření tunelu v simulačním programu <sup>Autor</sup> .....	49
Obr. 49 Operace subtract <sup>Autor</sup> .....	49
Obr. 50 Finální výsledek subtractu <sup>Autor</sup> .....	50
Obr. 51 Kontrola správnosti určení okrajových podmínek <sup>Autor</sup> .....	51
Obr. 52 Vytvoření sítě v simulačním programu <sup>Autor</sup> .....	51
Obr. 53 Úprava počtu prismatických vrstev <sup>Autor</sup> .....	52
Obr. 54 Zobrazení rychlosti proudění při vstupní rychlosti 80 km/h a tvořící se víry <sup>Autor</sup> .....	53
Obr. 55 Proudnice zobrazené okolo soupravy při rychlosti 80 km/h <sup>Autor</sup> .....	53
Obr. 56 Rozložení tlaku na soupravě <sup>Autor</sup> .....	54
Obr. 57 Oblast přetlaku v příčniku pojezdu <sup>Autor</sup> .....	54

## Seznam tabulek

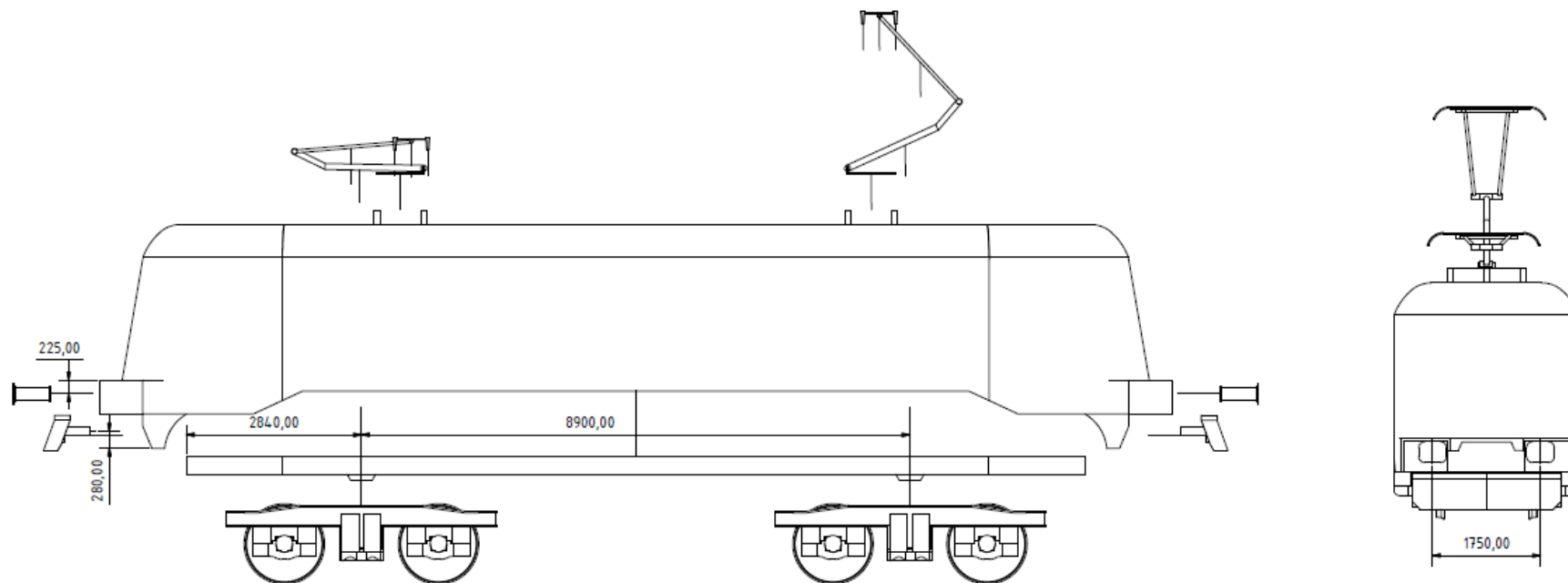
Tab. 1 Okrajové podmínky <sup>Autor</sup> .....	50
Tab. 2 Fyzikální modely zvolené pro simulaci <sup>Autor</sup> .....	52

## Seznam příloh

Příloha 1	Metodika skládání vozidel
Příloha 2	Metodika vkládání sestav do simulačního programu

## Příloha 1: Metodika skládání vozidel

### Lokomotiva 109E



Délka lokomotivy [m]

18,2

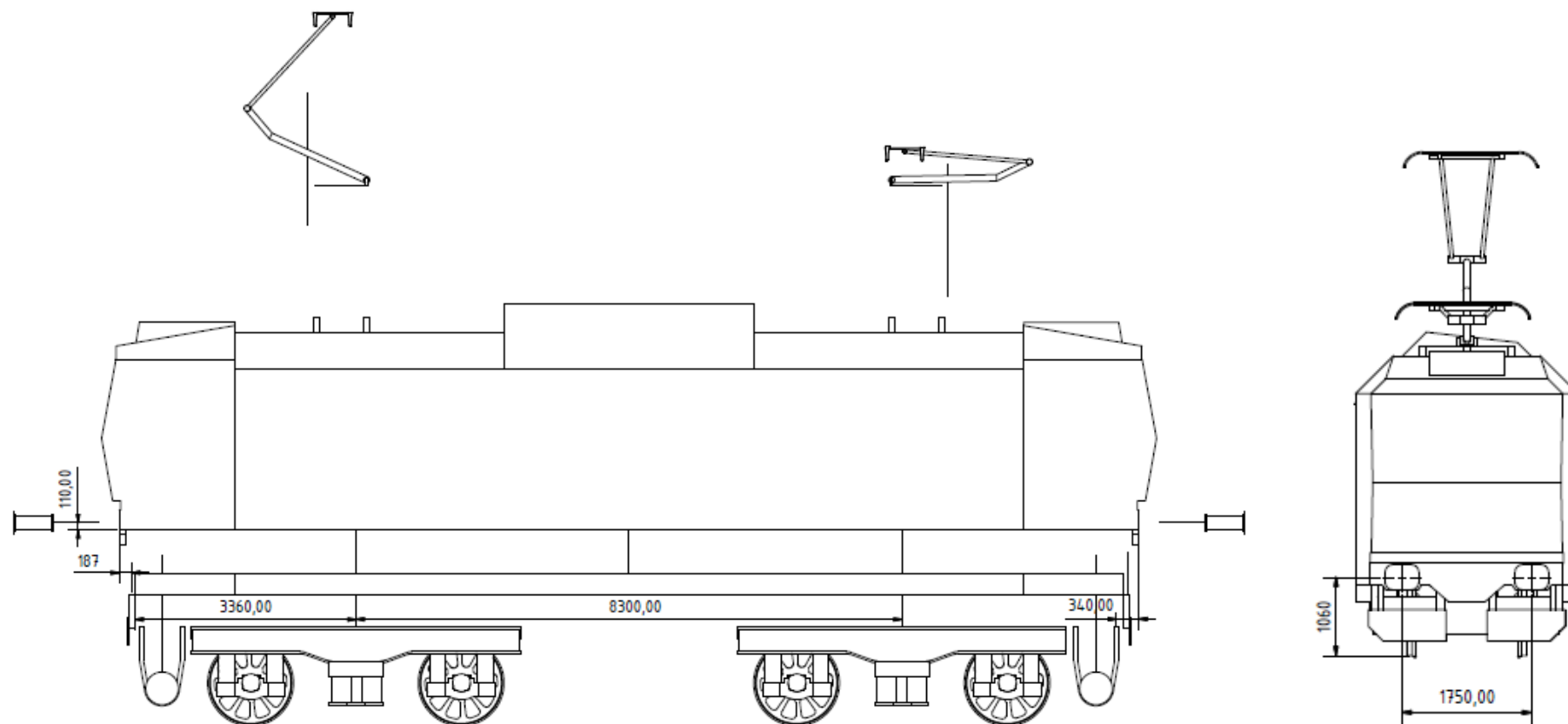
Šířka lokomotivy [m]

3

Výška lokomotivy (bez sběrače) [m]

3,8

## Lokomotiva 363



Délka lokomotivy [m]

16,72

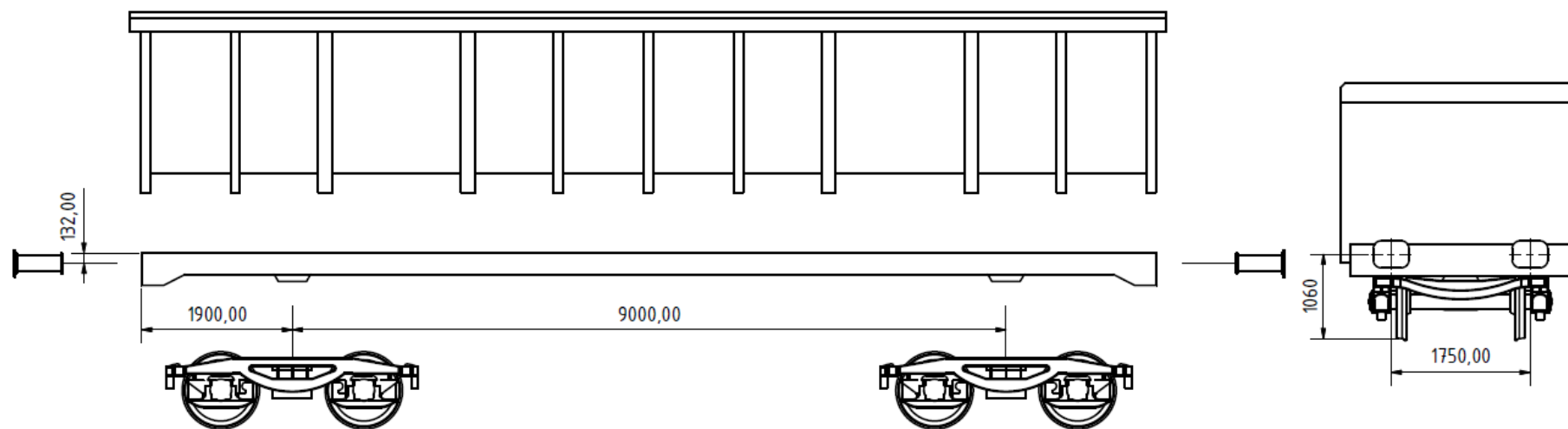
Šířka lokomotivy [m]

3

Výška lokomotivy (bez sběrače) [m]

4,3

## Vůz Eas

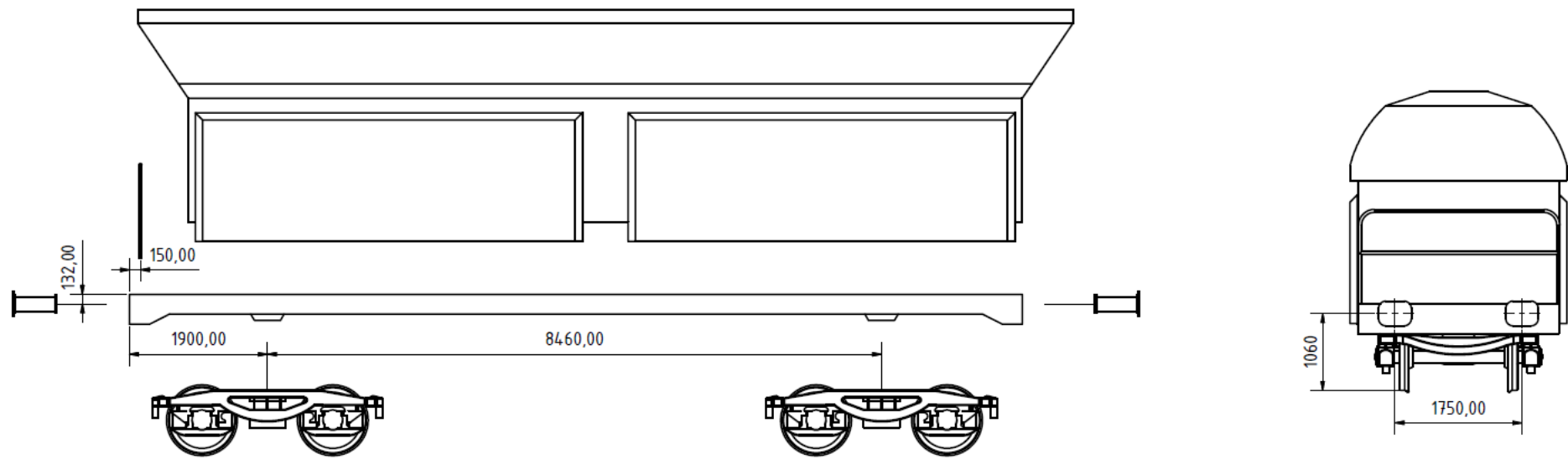


Délka vozu [m]  
14,02

Šířka vozu [m]  
3

Výška vozu [m]  
3,223

## Vůz Falns



Délka vozu [m]

13,52

Šířka vozu [m]

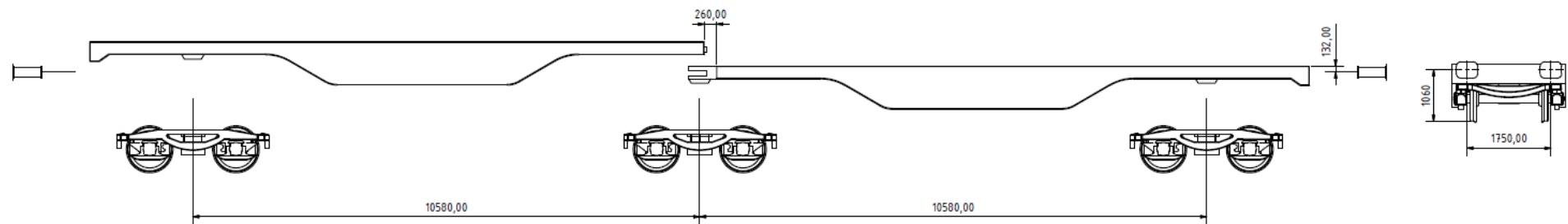
2,99

Výška vozu [m]

4,115



## Vůz Sggrss



Délka vozu [m]

26,68

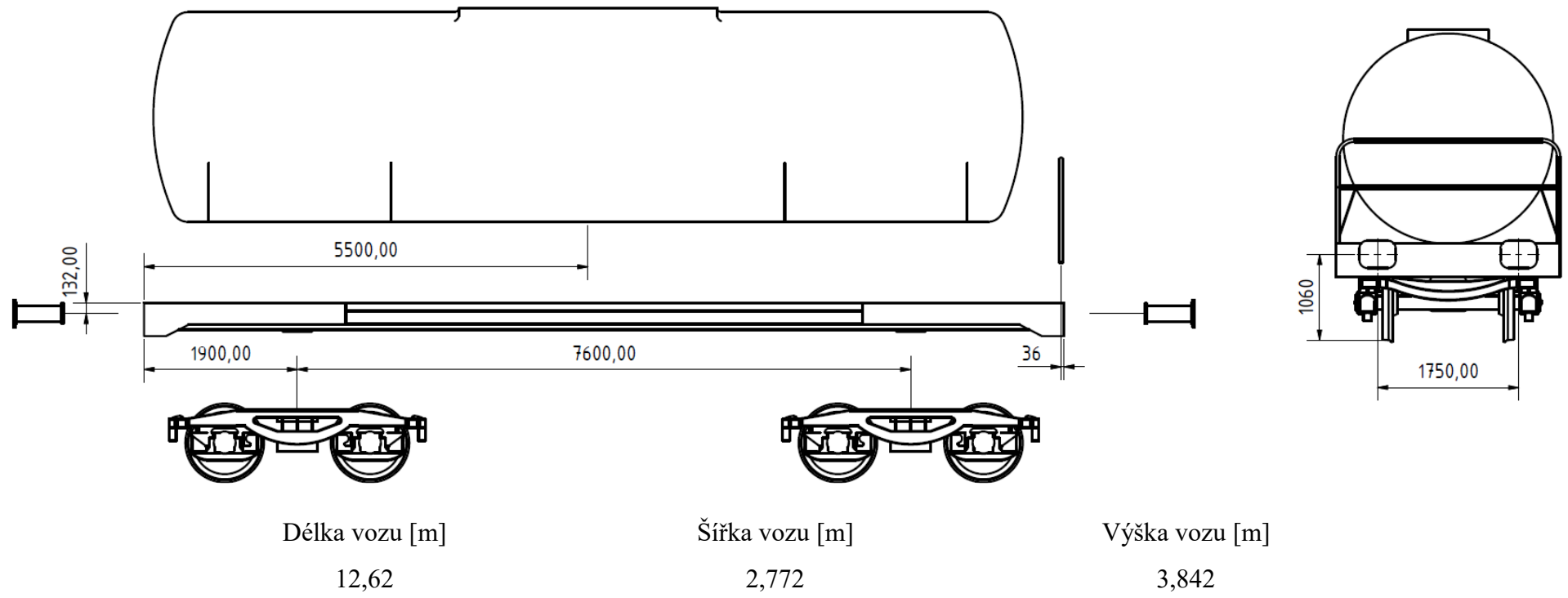
Šířka vozu [m]

2,38

Výška vozu [m]

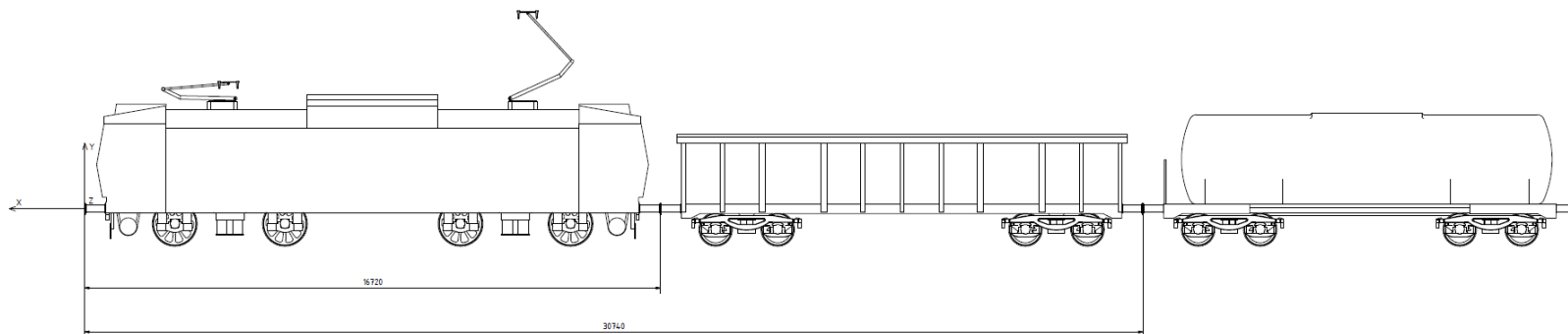
1,192

# Vůz Zaes



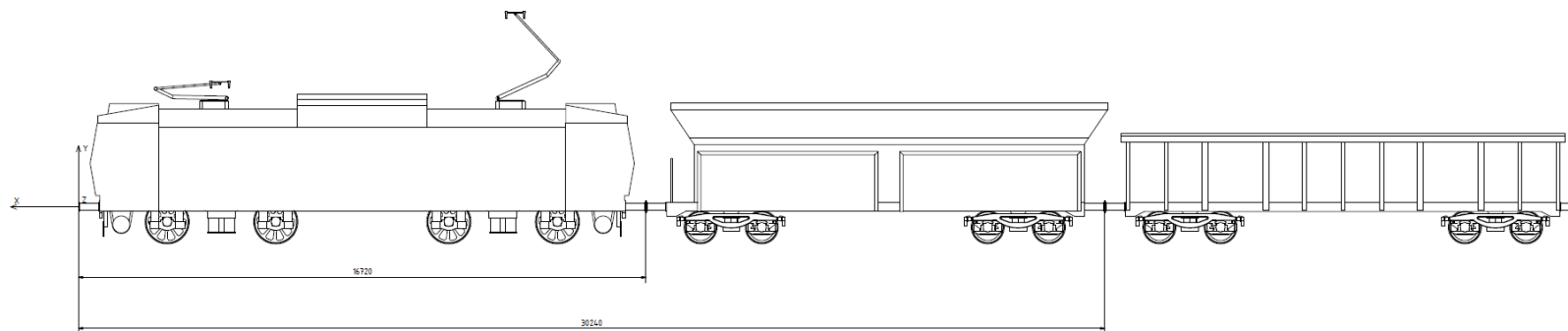
## Příloha 2: Metodika vkládání sestav do simulačního programu

### Hnací vozidlo typu 363



Vzdálenost od středu souřadnic [m]

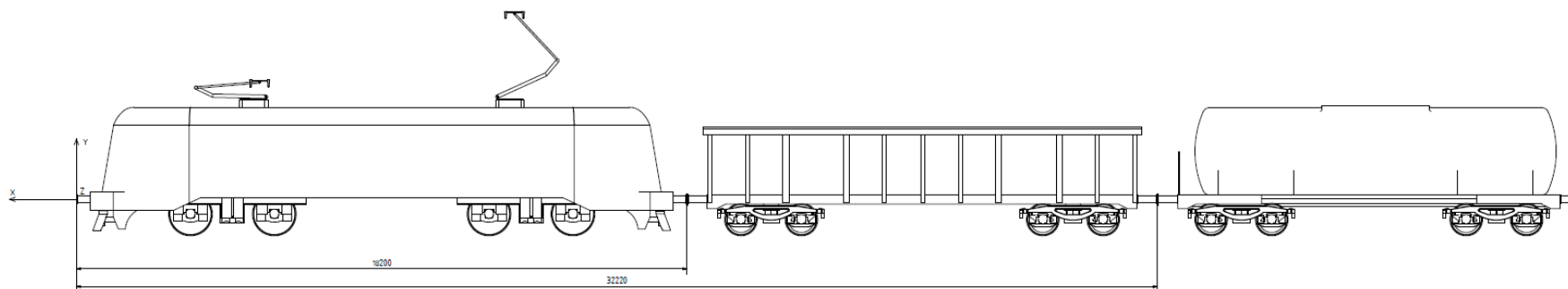
16,72



Vzdálenost od středu souřadnic [m]

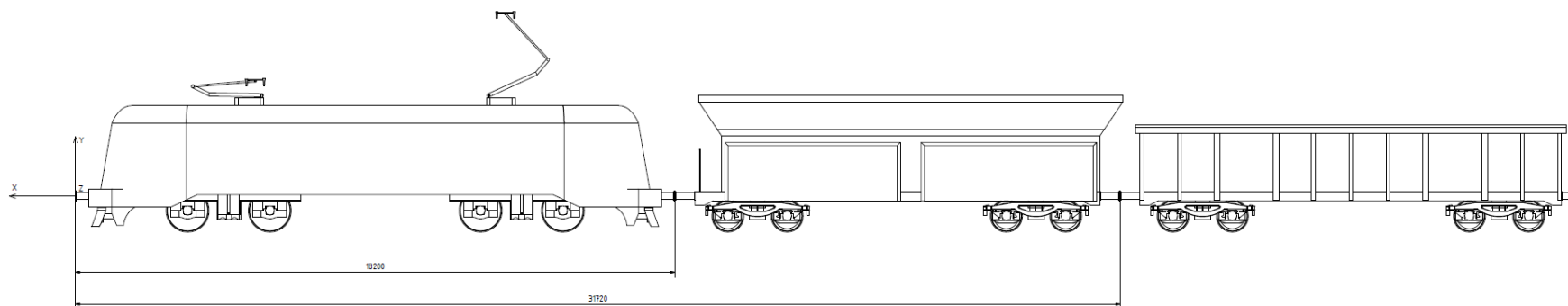
16,72

## Hnací vozidlo typu 109E



Vzdálenost od středu souřadnic [m]

18,2



Vzdálenost od středu souřadnic [m]

18,2